



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**Oulun Yliopiston tutkimustyön hiilikädenjälki –  
Positiivisten ilmastovaikutusten mittari**

*Anna Kemppainen*

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Joulukuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Oulun Yliopiston hiilikädenjälki – Positiivisten ilmastovaikutusten mittari

Anna Kemppainen

Oulun yliopisto, Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2021, 116 s. + 8 liitettä

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Prof. Eva Pongrácz

Organisaatioiden toiminnan hiilijalanjäljen selvittäminen on yleistynyt viime vuosien aikana ja myös Oulun Yliopisto on halunnut selvittää omasta toiminnastaan aiheutuvan hiilijalanjäljen suuruuden. Hiilijalanjälkityöryhmän tarkoituksena oli laskea yliopiston hiilijalanjäljen suuruus sekä esittää toimenpiteitä sen pienentämiseksi. Laskenta aloitettiin vuoden 2021 aikana ja hiilijalanjäljen rinnalla haluttiin selvittää myös positiivisia ilmastovaikutuksia kuvaava hiilikädenjälki. Tämän työn tavoitteena oli määrittää hiilikädenjälki Oulun Yliopiston tutkimustyölle.

Ennen varsinaista hiilikädenjälkilaskentaa työssä käytiin läpi ilmastonmuutosta, siitä aiheutuvia vaikutuksia sekä keinoja sen hillintään. Suomi on asettanut hiilineutraaliustavoitteen vuoteen 2035 ja yliopistoilla on suuri rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä sekä tämän tavoitteen saavuttamisessa. Tutkimustyön ansiosta voidaan löytää keinoja vähentää erilaisten materiaalien ja prosessien päästöjä sekä kasvattaa hiilinielujen määrää.

Hiilikädenjälkilaskenta itsessään on vielä melko uutta eikä sen määrittelyyn ole vielä tarkkoja tai vakiintuneita ratkaisuja. Laskentaa on tähän asti tehty lähinnä yritysten toimesta, mutta tutkimustyön kohdalla laskentametodeja ei ole vielä määritelty. Teknologian kehitys ja teknologian valmiustaso toimivat apuna, kun selvitettiin, missä tapauksessa tutkimukset kasvattavat suoraan hiilikädenjälkeä ja mitkä tutkimukset vaativat vielä jatkokehittelyä.

Tutkimusprojektien mahdollisia päästövähennyksiä pohdittiin yhdessä tutkijoiden kanssa ja tietoa kerättiin haastatteluiden avulla. Tutkijoiden avulla saatiin aikaan arvio mahdollisista päästövähennyksistä ja seuraavaksi oli määritettävä, mitkä tutkimukset

kasvattavat suoraan Oulun Yliopiston hiilikädenjälkeä. Joidenkin projektien kohdalla tarvitaan vielä jatkotutkimuksia tai tarkempia arvioita siitä, millaisia päästövähennyksiä niillä on. Lisäksi haastatteluissa nousi esiin useita tutkimuksia, joiden päästövähennysmahdollisuudet ovat epäsuoria tai tutkimukset liittyvät toisiin projekteihin, eikä niitä siitä syystä voitu laskea sellaisenaan mukaan hiilikädenjälkeen. Jokaisella tutkimuksella on kuitenkin suuri merkitys ja ilman niitä ei päästövähennyksiä ja hiilineutraaliutta välttämättä saavuteta.

Lopulliseksi hiilikädenjäljen arvoksi saatiin noin 6,7 miljoonan tonnia hiilidioksidia, joka syntyy mukaan laskettujen tutkimusten päästövähennyspotentiaalista. Useimmissa projekteissa Päästövähennykset toteutuisivat vuosien 2035-2040 välillä, eli ne tukevat Suomen hiilineutraaliustavoitetta. Tutkimusten päästövähennysten toteutuminen on kuitenkin vielä epävarmaa, sillä aikataulu niille on melko pitkä. Jotta päästövähennykset toteutuisivat, tulisi yritysten ottaa tutkimustuloksiaan mukaan vähentääkseen oman toimintansa päästöjä. Laskentaan ja tutkimusprojekteihin liittyvien epävarmuuksien vuoksi päästövähennysten toteutumista tulisi seurata jatkossa. Hiilikädenjäljen suuruus voi vielä muuttua ja aikataulu mahdollisille päästövähennyksille tarkentua.

*Asiasanat: ilmastonmuutos, hiilineutraalius, hiilijalanjälki, hiilikädenjälki, tutkimus*

# ABSTRACT

The carbon handprint of the University of Oulu – A measure of positive climate impacts

Anna Kemppainen

University of Oulu, Environmental Engineering

Master's thesis 2021, 116 pp. + 8 Appendixes

Supervisor at the university: Prof. Eva Pongrácz

In order to mitigate climate change, organizations have increasingly pledged to reduce their greenhouse gas emissions. As a tool of quantifying carbon emissions, carbon footprint calculations have become more and more common. The University of Oulu also wanted to find out the carbon footprint of its own activities, and a Carbon Footprint working group was set up. The aim was to determine the carbon footprint and also recommend reduction measures. In addition, the aim was also to determine the carbon handprint of research, which describes the positive climate impacts of the university. The goal of this work was to determine the carbon handprint of the research work of the University of Oulu.

In the theory part of this work, climate change, its effects and the ways to mitigate it are discussed. Finland has set a carbon-neutral target for 2035 and universities have a significant role in doing research work and providing studies to mitigate climate change and help in achieving carbon-neutral targets. Thanks to the research work, ways to reduce emissions of various processes and materials can be found. Increasing carbon sinks and improve their conditions are also under research.

The carbon handprint is still relatively new concept and there are no precise or well-established solutions to define it. At the moment, calculations have been made mainly by companies and the calculation methods for the research work have not yet been defined. Technological developments and technology readiness level help to define the projects which will increase the carbon handprint of the university.

Possible emissions reductions for research projects were discussed together with researchers. Data were collected through interviews and estimations of possible emission



reductions were obtained in communication with the researchers. After that it was necessary to determine which studies directly increased the carbon handprint and which studies required further development and research works until it can provide some concrete numbers for the carbon handprint. However, every study has a significant role and without them emission reductions and carbon neutrality may not be achieved.

The final value of the carbon handprint was found to be around 6,7 million tons of carbon dioxide, based on the emissions reduction potential of the included studies. In most projects, the emissions reductions would be realized between 2035 and 2040, which will support Finland's carbon neutrality target. However, there are still several uncertainties in the calculations and research projects, therefore the implementation of emission reductions should be monitored in the future. The carbon handprint may still change and the schedule of possible emission reductions may be specified.

*Keywords: climate change, carbon neutrality, carbon footprint, carbon handprint, research*

# ALKUSANAT

Tämän työn tarkoituksena oli määritellä hiilikädenjälki yliopiston tutkimustyöhön liittyen ja laskea mahdollinen arvio niille päästövähennysmahdollisuuksille, joita Oulun Yliopisto tutkimuksillaan voi tarjota. Työtä tehtiin vuoden 2021 aikana ja se liittyi Oulun Yliopiston hiilijalanjälkityöryhmän ja hiilijalanjälkilaskennan tavoitteisiin. Tavoitteena oli saada niin tarkka arvio hiilikädenjäljestä kuin se tällä hetkellä on mahdollista.

Työn ohjaajana toimi Prof. Eva Pongrácz, jota haluankin kiittää avusta ja tuesta tämän työn tekemisessä. Asiantuntevat kommenttisi ja mielipiteesi ovat auttaneet suuresti eteenpäin niin tämän työn kuin muidenkin opintojeni parissa. Sinulta on aina löytynyt vastauksia ja ehdotuksia jokaisessa tilanteessa. Lisäksi haluan kiittää jokaista tutkijaa, tutkimusyksikköä ja tutkimusryhmää avustanne ja osallistumisestanne tähän työhön. Ilman teidän asiantuntevaa apuanne tämän työn tekeminen olisi ollut mahdotonta.

Oman erityiskiitoksensa ansaitsee perheeni, joka on tukenut ja auttanut minua eteenpäin aina. Ihania ystäviäni haluan kiittää kaikesta tuesta näiden vuosien aikana. Kanssanne olen saanut kokea uskomattomia hetkiä ja hankkia unohtumattomia muistoja. Lopuksi haluan kiittää erityisesti Jonia kaikesta tuestasi, joka on ollut korvaamattoman tärkeää näiden vuosien aikana. Olet patistanut minua eteenpäin, mutta pitänyt myös huolen siitä, että elämääni on mahtunut paljon muutakin kuin opinnot.

Oulu, 14.12.2021

*Anna Kemppainen*  
Työn tekijä

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

SANASTO

|  |    |
|--|----|
| 1. Johdanto.....   | 10 |
| 2. Ilmastonmuutos .....  | 13 |
| 2.1. Ilmastonmuutoksen vaikutukset .....   | 14 |
| 2.1.1. Ilmastonmuutoksen vaikutukset talouteen .....                                   | 17 |
| 2.1.2. Ilmastonmuutoksen sosiaaliset vaikutukset .....                                 | 19 |
| 2.2. Ilmastonmuutoksen hillintä ja siihen sopeutuminen .....                           | 20 |
| 2.2.1. Ilmastonmuutoksen hillintä .....  | 20 |
| 2.2.2. Green deal -sopimukset .....  | 21 |
| 2.2.3. Kioton pöytäkirja ja Pariisin ilmastopöytäkirja .....                           | 22 |
| 2.2.4. Sopeutuminen ilmastonmuutokseen .....   | 23 |
| 2.3. Hiilineutraaliustavoite .....   | 25 |
| 3. Työkaluja ilmastonmuutoksen hillintään .....  | 28 |
| 3.1. Elinkaariarviointi .....  | 28 |
| 3.2. GHG-protokolla .....  | 29 |
| 3.3. Hiilijalanjälki – negatiivisten ilmastovaikutusten mittari .....                  | 31 |
| 3.4. Hiilikädenjälki – uusi mittari positiivisten ilmastovaikutusten arviointiin ..... | 32 |
| 4. Teknologian elinkaari ja valmiustaso .....  | 38 |
| 4.1. Teknologian elinkaari .....   | 38 |
| 4.2. Teknologisten innovaatioiden aallot .....   | 39 |
| 4.3. Teknologinen valmiustaso .....  | 40 |
| 5. Kasvihuonekaasupäästöt ja niiden vähennyskeinot .....                               | 44 |
| 5.1. Kasvihuonekaasupäästöt Suomessa .....   | 44 |
| 5.2. Kasvihuonekaasupäästöjen vähennyskeinot .....                                     | 48 |
| 6. Oulun Yliopiston tutkimustyö .....  | 52 |
| 6.1. Oulun Yliopisto .....   | 52 |
| 6.1.1. Teknillinen tiedekunta .....  | 53 |

|   |    |
|---|----|
| 6.1.2. Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta .....  | 58 |
| 6.1.3. Luonnontieteellinen tiedekunta .....   | 60 |
| 6.2. Hiilijalanjälki Oulun Yliopistossa .....   | 60 |
| 7. Päästövähennyksiin tähtäävät tutkimusprojektit Oulun Yliopistossa .....                      | 63 |
| 7.1. Suoriin päästövähennyksiin tähtäävät tutkimusprojektit.....                                | 67 |
| 7.2. Prosessin tehostamisella päästövähennyksiin tähtäävät tutkimusprojektit.....               | 71 |
| 7.3. Energiatehokkuuden parantamista tai energiansäästöä tavoittelevia tutkimusprojekteja ..... | 74 |
| 7.4. Substituution avulla päästövähennyksiä tavoittelevat tutkimusprojektit.....                | 76 |
| 7.5. Hiilidioksidin hyödyntämiseen tai varastointiin liittyvät tutkimukset .....                | 81 |
| 7.6. Luonnon hiilivarastoihin liittyvät tutkimukset .....                                       | 83 |
| 8. Hiilikädenjälkilaskennan lopputulokset .....   | 87 |
| 8.1. Tutkimustyön hiilikädenjälki Oulun Yliopistossa.....                                       | 88 |
| 8.2. Hiilikädenjälkilaskentaan liittyvät epävarmuudet .....                                     | 91 |
| 8.3. Jatkoehdotuksia tutkimustyön hiilikädenjälkilaskentaan .....                               | 94 |
| Yhteenveto .....  | 96 |
| LÄHDELUETTELO .....   | 98 |
| LIITEET:  |    |
| Liite 1. Tietojenkeruutaulukko Prosessimetallurgian tutkimusyksikön projekteista                |    |
| Liite 2. Tietojenkeruutaulukko Ympäristö- ja kemiantekniikan tutkimusyksikön projekteista       |    |
| Liite 3. Tietojenkeruutaulukko Energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikön projekteista      |    |
| Liite 4. Tietojenkeruutaulukko Kuitu- ja partikkelitekniikan tutkimusyksikön projekteista       |    |
| Liite 5. Tietojenkeruutaulukko Vesi- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikön projekteista         |    |
| Liite 6. Tietojenkeruutaulukko Älykkäät koneet ja järjestelmät -tutkimusyksikön projekteista    |    |
| Liite 7. Tietojenkeruutaulukko Arkkitehtuurin tutkimusyksikön projekteista                      |    |
| Liite 8. Tietojenkeruutaulukko NMR -tutkimusyksikön projekteista                                |    |

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

|                       |  |
|-----------------------|--|
| CCS                   | Carbon Capture and Storage, Hiilen sidonta ja varastointi  |
| CO <sub>2</sub> -ekv. | Hiilidioksidiekvivalentti, eri kasvihuonekaasujen yhteenlaskettu ilmastoa lämmittävä vaikutus      |
| EU                    | Euroopan Unioni  |
| GHG                   | Greenhouse gas, kasvihuonekaasut   |
| Gt                    | Gigatonni, miljardi tonnia   |
| IPCC                  | Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli   |
| kt                    | kilotonni, tuhat tonnia  |
| LCA                   | Life cycle assessment, elinkaariarviointi  |
| LULUCF                | Euroopan Unionin politiikka maankäytön, maankäytön muutosten ja metsien ilmastovaikutuksen suhteen |
| LUKE                  | Luonnonvarakeskus  |
| Mt                    | Megatonni, miljoona tonnia   |
| SYK                   | Suomen Yliopistokiinteistöt Oy   |
| SYKE                  | Suomen Ympäristökeskus   |
| TRL                   | Technology readiness level, teknologian valmiustaso  |
| VTT                   | Teknologian tutkimuskeskus Oy  |
| YK                    | Yhdistyneet kansakunnat  |

## SANASTO

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Enabler -tutkimus       | Tutkimus, jonka työ ja tulokset mahdollistavat jonkin toisen tutkimuksen onnistumisen   |
| GHG-protokolla          | Greenhouse Gas Protocol, maailmanlaajuinen standardi hiilijalanjäljen laskentaan  |
| Green deal              | Vapaaehtoinen sopimus valtion ja elinkeinoelämän välillä, minkä avulla etsitään ratkaisuja ilmastohaasteisiin                   |
| Hiilijalanjälki         | Tuotteen, toiminnan tai palvelun aiheuttama ilmastokuorma   |
| Hiilikädenjälki         | Tuotteen tai palvelun positiivinen ilmastovaikutus  |
| Hiilineutraalius        | Tilanne, jossa hiilidioksidipäästöjä tuotetaan vain sen verran kuin niitä pystytään sitomaan, eli nettohiilijalanjälki on nolla |
| Kioton pöytäkirja       | YK:n ilmastomuutosta käsittelevä sopimus  |
| Pariisin ilmastosopimus | Kansainvälinen sopimus, jonka tavoitteena ilmastomuutoksen hidastaminen   |



# 1. JOHDANTO

Ilmastomuutos on vakava globaali ongelma, joka vaikuttaa jokaiseen ihmiseen maapallolla. Sitä voidaan pitää kenties suurimpana globaalina haasteena, jonka ihmiskunta on koskaan kohdannut. Veden saanti ja ruoan tuotanto voi vaikeutua sekä helleaallot lisääntyä, minkä lisäksi elinympäristöihin voi kohdistua paljon muutoksia, sillä esimerkiksi luonnonolot, monimuotoisuus ja useat lajit voivat kärsiä merkittävästi ilmastomuutoksen vaikutuksista. Ympäristön ja ekosysteemin lisäksi ilmastomuutos uhkaa myös talouskasvua sekä yleistä hyvinvointia. Ilmastomuutoksen hallinta onkin nykyään oleellinen osa kaikkea toimintaa, johon jokainen ihminen, yritys ja organisaatio voi vaikuttaa omalla toiminnallaan. (Rohweder & Virtanen, 2011, s. 11-13)

Ilmastomuutokseen ja sen hillintään liittyy läheisesti myös termi kestävä kehitys. Sillä tarkoitetaan jatkuvaa yhteiskunnallista muutosta, jonka päämääränä on turvata niin nykyisille kuin tulevillekin sukupolville hyvät elämisen mahdollisuudet. Kestävää kehitystä tapahtuu maailmanlaajuisesti, alueellisesti ja paikallisesti niin, että ympäristö, ihminen ja talous otetaan tasavertaisesti huomioon. Se voidaankin jakaa kolmeen osa-alueeseen: ympäristön kestävyys, taloudelliseen kestävyys sekä sosiaaliseen kestävyys. Kestävä talous on edellytys yhteiskunnan toiminnoille, mutta talouskasvun on tapahduttava niin, että biologinen monimuotoisuus sekä ekosysteemien toimivuus säilyvät. Lisäksi on taattava hyvinvoinnin edellytykset ja niiden siirtyminen myös tuleville sukupolville. Sosiaalisen kestävyys turvaamisessa on paljon haasteita, sillä jatkuvaan väestönkasvuun, köyhyyteen, ruoka- ja terveydenhuoltoon, koulutukseen ja sukupuolten väliseen tasa-arvoon liittyy vielä ratkaistavia ongelmia. Kansalaisten perushyvinvointi on tärkeä edellytys kestävyys edistämiseksi ja sosiaalisen kestävyys haasteet vaikuttavat merkittävästi myös ekologiseen ja taloudelliseen kestävyys. (Ympäristöministeriö, 2021a)

YK:lla on oma kestävä kehityksen tavoiteohjelma: Agenda 2030, jolla tähdätään äärimmäisen köyhyyden poistamiseen sekä kestävä kehityksen toteutumiseen jokaisella osa-alueella. Tavoitteita on yhteensä 17 ja ne sisältävät 169 alatavoitetta, jotka koskevat niin sosiaalisia, ekologisia kuin taloudellisiakin ongelmia. (YK-liitto, 2021a) Tavoite numero 13 liittyy ilmastotekoihin ja tavoitteena on toimia kiireellisesti sekä ilmastomuutosta, että sen vaikutuksia vastaan. Sen alatavoitteina on parantaa kaikkien maiden kykyä ilmastomuutokseen sopeutumisessa, erityisesti liittyen riskitekijöihin ja

luonnonkatastrofeihin. Sään ääri-ilmiöt aiheuttavatkin suurimmat inhimilliset sekä taloudelliset tappiot ja esimerkiksi taloudelliset tappiot ovat viisikymmenkertaiset puolessa vuosisadassa. Koulutuksen ja tietämyksen lisääminen ilmastomuutoksen hidastamiseen, sopeutumiseen, vaikutusten lievittämiseen sekä ennakkovaroituksiin liittyen on erittäin tärkeää ilmastomuutosta torjuttaessa. Toimenpiteet tulisi integroida osaksi kansallista politiikkaa sekä suunnittelua. Myös kehitysmaiden ilmastotoimilla on merkitystä ja erityisesti siellä tietoisuuden lisääminen on olennaista. Vähemmän kehittyneissä maissa painopiste on erityisesti naisissa, nuorissa ja paikallisissa yhteisöissä. (YK-liitto, 2021b)

Ilmastomuutoksen torjuntaan tarvitaan toimia laajasti useilta osa-alueilta. Poliittisten päätösten merkitys on suuri päästövähennyksiä tavoitellessa. Globaali ongelma vaatii globaalia yhteistyötä, eli yhteisellä toimintasuunnitelmalla ja yhteisillä sitoumuksilla voidaan saavuttaa yhtenäisiä tavoitteita ja löytää keinoja päästövähennysten saavuttamiseksi. Taloudelliset ja poliittiset päätökset sekä toimet tarvitsevat rinnalleen myös teknisiä ratkaisuja. Jotta ilmakehän pitoisuudet saataisiin vakaiksi, tarkoittaa se pitkällä aikavälillä nollapäästöjä, mahdollisesti jopa hiilen poistoa ilmakehästä. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen, energiatehokkuuden kehittäminen sekä uusiutuvien energialähteiden käyttö vaativat uusia teknologisia innovaatioita ilmastomuutoksen hillinnässä. (Virtanen, 2011, s. 28-29) Uusien teknologioiden kehittämisessä yliopistot ja niiden tekemä tutkimustyö ovat avainasemassa. Yliopistojen tekemä tutkimus ja ratkaisujen tarjoaminen markkinakäyttöön voi vaikuttaa merkittävästi ilmastomuutoksen vastaisessa valtavassa työssä. Ilman tieteellistä tutkimusta ja uusia innovaatioita ilmastomuutoksen hillintä olisikin mahdotonta.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia Oulun Yliopiston osuutta ilmastomuutoksen vastaisessa työssä. Jo aiemmin Oulun Yliopistossa on perustettu hiilijalanjälkityöryhmä, jonka tarkoituksena on ollut selvittää yliopiston aiheuttamat päästöt sekä esittää toimenpiteitä hiilijalanjäljen pienentämiselle. Rinnalle on haluttu tuoda myös uudempi termi: hiilikädenjälki, jolla voidaan kuvata niitä positiivisia ilmastotekoja, joita organisaatio voi omalla toiminnallaan tehdä. Tutkimustyön merkitys ilmastomuutoksen hillinnässä on suuri ja siksi Oulun Yliopisto haluaakin selvittää oman toimintansa hiilikädenjäljen. Kyseessä on siis päästövähennyspotentiali, joka yliopiston tutkimustyöllä voidaan saavuttaa, kun uusia teknologioita voidaan tarjota yritysten käyttöön.

Oulun Yliopiston tutkimustyön hiilikädenjälkeä selvitetään seuraavien tutkimuskysymysten avulla:

1. Mikä on hiilikädenjälki ja miten se määritellään?
2. Mikä on Oulun Yliopiston hiilikädenjälki ja miten se määritellään?
3. Millä keinoilla hiilikädenjälki voidaan saavuttaa?
4. Mikä merkitys ajalla on päästövähennyksissä?

Työssä kartoitetaan Oulun Yliopistolla käynnissä olevia tutkimusprojekteja ja rajataan mukaan sellaiset, joilla on selkeitä päästövähennystavoitteita. Ennen projekteja ja niiden hiilikädenjälkeä käydään kuitenkin läpi taustaa ilmastonmuutokselle ja sen vaikutuksille. Päästövähennysten merkitys ja mahdolliset keinot niiden saavuttamiseksi pohjustavat myös hiilikädenjäljen määrää. Tärkeää on määritellä hiilikädenjälki mahdollisimman tarkasti ja pohtia, miten aika ja teknologian kehitys vaikuttaa siihen, kasvaako hiilikädenjälki. Hiilikädenjälki on terminä melko uusi ja sitä ollaan hyödynnetty lähinnä yritysten toiminnassa. Tavoitteena on selvittää mahdollinen hiilikädenjälki, jonka Oulun Yliopisto pystyy omalla tutkimustyöllään kerryttämään. Hiilikädenjälki ei kuitenkaan suoraan liity esimerkiksi hiilijalanjäljen tai aiheutettujen päästöjen määrään, vaan sitä on tarkasteltava itsenäisenä lukuna.



## 2. ILMASTONMUUTOS

Ilmaston lämpeneminen vaikuttaa kaikkialla maailmassa ja lähes jokaisella osa-alueella. Vuodesta 1880 eteenpäin aina 2010-luvun alkuun ilmaston lämpenemistä on tapahtunut noin 0,85 Celsiusasteen verran ja tästä suurin osa on tapahtunut erityisesti viimeisten kuudenkymmenen vuoden aikana. Lämpeneminen näkyy maapallon keskilämpötilan kehittymistä seuraamalla, mutta nousu ei ole tasaista, vaan siinä on sekä nopeampia että hitaampia vaiheita. (Ilmatieteen laitos, 2017) Uusimmassa, vuonna 2021, ilmestyneessä ilmastoraportissa puolestaan kerrotaan, että maapallon pintalämpötila on noussut kahden vuosikymmenen aikana 0,99 astetta, kun vertailuna käytetään 1850-1900 -luvun lukemia. Kuluvan vuosikymmenen aikana, 2011-2020, pintalämpötila on ollut jopa 1,09 astetta korkeampi kuin viime vuosisadalla. (IPCC, 2021)

Pintalämpötilan muutoksen suurin syy löytyy kasvihuonekaasupäästöistä, jotka vapautuvat ilmakehään. Ne voimistavat kasvihuoneilmiötä, joka on itsessään luonnollinen ja välttämätön ilmiö, sillä ilman sitä maapallo ei olisi elinkelpoinen. Kasvihuoneilmiössä on kyse siitä, että ilmakehän kaasut, erityisesti hiilidioksidi ja vesihöyry, päästävät auringonsäteilyn lämmittämään maata ja samalla estävät lämpösäteilyä karkaamasta avaruuteen. Ilman tätä ilmiötä maapallon keskilämpötila olisi noin -18°C, kun tällä hetkellä se on noin 15°C. (Ruostenoja, 2011, s.69-70)

Ihmisten toimesta kasvihuonekaasujen määrä ilmakehässä on kuitenkin lisääntynyt huomattavasti. Erityisesti hiilidioksidi ja metaani sekä dityppioksidi ovat lisääntyneet ja näitä syntyy esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden käytöstä, maataloudesta, energiantuotannosta, jätteistä sekä metsien hävityksestä. Syntyneistä kasvihuonekaasuista osa siirtyy esimerkiksi maan ja merien hiilinieluihin, mutta on havaittu, että hiilinielujen sitomiskyky on heikentynyt kuluneiden vuosikymmenien aikana. Tämän vuoksi siis vapautuvista päästöistä yhä suurempi osa jää ilmakehään ja mikäli hiilinielut heikkenevät yhä, on vapautuvien päästöjen osuus ilmakehässä yhä suurempi. (Virtanen, 2011, s.22-23) Eniten ilmastonmuutokseen vaikuttaa ihmiskunnan tuottama hiilidioksidi, jonka pitoisuus onkin noussut huomattavasti. Ennen teollistumista sen pitoisuus oli noin 280 ppm (Ruostenoja, 2011, s.70), kun uusimman ilmastoraportin mukaan pitoisuus on saavuttanut jo noin 410 ppm vuonna 2019. (IPCC, 2021)

## 2.1. Ilmastomuutoksen vaikutukset

Ilmastomuutos näkyy niin jäätiköillä kuin merissäkin. Niin Grönlannin kuin Etelämantereenkin mannerjäätiköt kutistuvat kiihtyvällä tahdilla. Tämän lisäksi roudan sekä lumen määrä vähenee. Valtamerien ylimmät kerrokset jopa 700 metrin syvyyteen asti ovat lämmenneet kuluvien 40 vuoden aikana. Esimerkiksi ylimmät 75 metriä merenpinnasta ovat lämmenneet lähes puoli astetta. Myös erilaiset sääilmiöt ovat muuttuneet, sillä esimerkiksi pohjoisilla maa-alueilla sateet ovat lisääntyneet, kun puolestaan esimerkiksi Välimeren alueilla sekä eteläisessä Afrikassa sademäärät ovat pienentyneet. (Ilmatieteen laitos, 2017)

Uusimmassa, IPCC:n kuudennessa arviointiraportissa on esitelty jo käynnissä olevia muutoksia, joita ilmaston lämpeneminen aiheuttaa. Ilmatieteenlaitos ja Ympäristöministeriö on koonnut suomenkielistä infografiikkaa ilmastoraportin pohjalta. Raportissa esitellään useita eri skenaarioita, joissa ilmaston lämpeneminen vaihtelee yhden ja yli neljän celsiusasteen välillä. Jokaiselle skenaariolle yhteistä on kuitenkin se, että 1,5 asteen lämpeneminen tullaan ylittämään 2030-luvun alussa. Päästöjen voimakkaalla vähentämisellä voidaan kuitenkin vielä saada palautettua keskilämpötila 1,5 asteeseen vuosisadan loppupuolella. Tämä edellyttää sitä, että päästövähennykset tapahtuvat viipymättä, minkä lisäksi ilmasta pitää pystyä sitomaan jo sinne vapautunutta hiilidioksidia. (Ilmatieteen laitos & Ympäristöministeriö, 2021)

Osa ilmastomuutoksen seurauksista ovat jo peruuttamattomia. Ilmatieteenlaitoksen ja Ympäristöministeriön kokoamia seurauksia on esitelty alla olevassa kuvassa 1, joka pohjautuu IPCC:n uusimpaan ilmastoraporttiin. Peruuttamattomia seurauksia ovat valtamerien pinnannousu sekä merien happamoituminen ja happipitoisuuksien laskeminen. Näiden lisäksi jäätiköiden kutistumista ei voida enää peruuttaa. Ilmastomuutoksesta aiheutuu myös useita muita seurauksia, jotka voivat vielä parantua, mikäli ilmastomuutos saadaan pysähtymään. Erilaiset sääolosuhteet muuttuvat, kun sekä rankkasateet että myös kuivuus lisääntyy. Ilmastovyöhykkeet siirtyvät kohti napoja ja merivesi lämpenee. Ilmakehässä kasvihuonekaasujen määrä lisääntyy, ilmakehän alaosa lämpenee ja kosteussisältö kasvaa. Merellä merivesi lämpenee ja merien sekä järvien jäät vähenevät. Myös lumipeite vähenee. (Ilmatieteenlaitos & Ympäristöministeriö, 2021)

### Ilmastomuutos näkyy maalla, merissä ja ilmakehässä.

Jo tapahtuneet muutokset jatkuvat ja osa niistä on peruuttamattomia vuosisatojen tai -tuhansien ajan.



Pohjautuu IPCC:n 6. arviointiraportin tuloksiin, 1. osaraportti. © Ilmatieteen laitos ja ympäristöministeriö, 2021. Ilmasto-opas.fi.



Kuva 1. Ilmastomuutoksen seuraukset (Ilmatieteenlaitos & Ympäristöministeriö, 2021)

Erittäin kuumat päivät ja esimerkiksi helleaallot ovat lisääntyneet ja voimistuneet 1950-luvulta eteenpäin, kun taas kylmät päivät ja ajanjaksot ovat puolestaan lievempiä ja harvinaisempia. Pidetään todennäköisenä, että nämä ovat seurausta ihmisten toimista ja jotkut ääripäät olisivat olleet epätodennäköisiä ilman ihmisten vaikutusta. Myös runsaiden sateiden esiintyvyys on lisääntynyt merkittävästi, kun taas toisaalta osa maapallon alueista kärsii kuivuuden lisääntymisestä. Monsuunisateet puolestaan ovat ensin vähentyneet 1950-1980 -luvuilla, mutta niiden määrä on kääntynyt nousuun kasvihuonekaasupitoisuuksien kasvun vuoksi. (IPCC, 2021, s.10)

Ilmaston lämmetessä myös ääripäiden erilaiset muutokset lisääntyvät. Jos ilmasto lämpenee 0,5 astetta edellisestä lämpötilasta, ilmenee esimerkiksi helleaaltoja ja rankkasateita aiempaa useammin. Kuivuus voi lisääntyä tietyillä alueilla huomattavasti, kun taas sademäärien ennustetaan yleisesti lisääntyvän noin 7 % jokaista yhden asteen lämpötilan nousua kohden. Myös erilaisten trooppisten syklonien ja esimerkiksi niiden tuulen huippunopeuksien ennustetaan lisääntyvän tulevaisuudessa. (IPCC, 2021, s.18-20)

Mitä enemmän ilmasto pääsee lämpenemään, sitä pahemmaksi seuraukset muuttuvat, sillä riskit ja vaikutukset kertaantuvat lämpötilan noustessa. Mikäli ilmasto lämpenee kahden asteen verran, kerran vuosikymmenessä tapahtuvat kuivuusjaksot iskevät 3,1 kertaa todennäköisemmin. 1,5 asteen kohdalla lukema on puolestaan 2,4-kertainen. Myös trooppisten myrskyjen määrä kasvaa huomattavasti ja mikäli ilmasto lämpenee kaksi



astetta, kasvaa määrä 13 %. Lukemia on verrattu esiteolliseen aikaan, eli vuosiin 1850–1900, jonka jälkeen ilmasto on alkanut lämpenemään. (Ilmatieteenlaitos & Ympäristöministeriö, 2021)

Norjan johtavan ilmastotutkimuskeskuksen, CICERO:n, vanhempi tutkija Robbie Andrew on käsitellyt myös ilmastomuutokseen liittyviä ongelmia, sekä ajan vaikutusta siihen, miten hyvin ilmastotavoitteita voidaan saavuttaa. Hänen mukaansa ilmastomuutoksen hidastamiseen ja lämpenemisen pitämiseen alle 1,5 °C tarvitaan ennennäkemättömiä ja erittäin merkittäviä päästövähennyksiä. Näiden tavoittaminen alkaa näyttää epätodennäköiseltä. Myös Andrew mainitsee, että lämpenemisen seuraukset moninkertaistuvat, jos ilmasto lämpenee esimerkiksi 2 °C, mikä olisi huomattavasti huonompi kuin 1,5 °C. Lisäksi ajalliset viivästykset ilmastomuutoksen hillinnässä kuluttavat jäljellä olevaa niin kutsuttua ilmastobudjettia. Jokainen vuosi, jolloin päästöjä ei vähennetä, budjettia käytetään yli 10 % jäljellä olevasta määrästä ja jäljellä oleva hiilibudjetti ilmastonlämpenemisen pitämiseksi alle 1,5 °C on pieni. (Andrew, 2020) Hiilibudjettia ovat esitelleet esimerkiksi Le Quéré et al. ja globaalilla hiilibudjetilla viitataan ympäristön hiilidioksidin häiriön keskiarvoon, vaihteluun sekä trendeihin, kun näitä verrataan teollisen aikakauden alkuun. Sen arvolla voidaan arvioida ihmisen toiminnan aiheuttamien päästöjen määrää, niiden pääsyä ilmakehään sekä ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvunopeutta. (Le Quéré et al., 2018)

IPCC:n kuudennessa arviointiraportissa on käsitelty ilmastomuutoksen tulevaisuusnäkymää viiden eri skenaarion avulla. Ensimmäisen skenaarion mukaisesti ilmasto lämpenee vielä 2040–2060 -luvuilla noin 1,6 asteen verran, vaihteluväli voi olla kuitenkin 1,2–2,0 astetta. Tämän jälkeen kuitenkin erilaiset ilmastomuutoksen vastaiset toimet alkavat laskemaan lämpötilaa niin, että vuosisadan lopussa lämpötila palaisi takaisin 1,4 asteeseen, vaihteluvälin ollessa 1,0–1,8. Muiden skenaarioiden mukaan lämpötilan nousua ei saada enää palaamaan alle 1,5 asteeseen ja lämpötila nousee vaan yhä enemmän. Viidennen skenaarion mukaan lämpötilan nousu voisi olla jopa 4,4 astetta kuluvan vuosisadan lopussa. Skenaarioissa esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen määrä vaihtelee ja ensimmäisen skenaarion mukaan päästöt ovat vähäisiä vuonna 2050, jonka jälkeen päästöt voivat olla jopa negatiivisia. Pahimmissa skenaariossa päästöt ovat puolestaan suuria tai erittäin suuria. Muissa skenaarioissa päästöt pysyvät nykyisellä tasolla myös vuoteen 2050 mennessä tai kaksinkertaistuvat vuoteen 2100 mennessä. (IPCC, 2021, s. 15)

Kuten uusimmasta arviointiraportista käy ilmi, ilmastonmuutoksen vaikutukset vaihtelevat erittäin paljon alueittain. Alueelliset erot ja esimerkiksi sademäärien vaihtelu tai äärimmäisten sääilmiöiden ilmaantuminen eri alueilla tekee ilmastonmuutoksesta epäoikeudenmukaisen. Pääsääntöisesti voidaan ajatella, että kehittyneet maat ovat vastuussa ilmastonmuutoksen vaikutuksista ja kehittyvät maat tulevat kärsimään seurauksista eniten. Vedensaannin sekä ruokahuollon ja maatalouden osalta voi aiheutua suuriakin alueellisia ongelmia, eikä köyhemmillä mailla ei ole välttämättä samanlaista kykyä ja resursseja sopeutua ilmastonmuutoksen tuomiin haasteisiin. Lisähaasteensa tuo vielä se, että ilmastonmuutos tulee koskettamaan myös myöhempiä sukupolvia, eikä vain nykyhetkeä. (Virtanen, 2011, s.30)

### **2.1.1. Ilmastonmuutoksen vaikutukset talouteen**

Ilmastonmuutoksen aiheuttamat vaikutukset ulottuvat myös talouteen. Muutoksesta aiheutuu erilaisia kustannuksia esimerkiksi luonnonilmiöiden lisääntyessä ja muuttuessa. Alueellisia eroavaisuuksia esiintyy paljon. Tulvat, kuivuus, rakennettuun ympäristöön liittyvät haasteet ja vauriot, helleaallot sekä esimerkiksi haittaeliöiden lisääntyminen voivat aiheuttaa suuriakin kustannuksia. Lisäksi ilmaston lämpenemisen mukana erilaisia sairastumisia ja sairastapauksia voi tulla enemmän. Lämpeneminen voi kuitenkin tuoda myös hyötyjä, kuten uusia liiketoimintoja. Vaikka ilmastonmuutos on maailmanlaajuinen, koetaan sen erilaiset seuraukset paikallisella tasolla, mikä aiheuttaa jo aiemmin mainittua epätasa-arvoisuutta eri alueiden välillä (Maa- ja metsätalousministeriö, 2014, s.14-15)

EU:n sopeutumisstrategiassa on esitetty, että vähimmäisarvo vuosittaisille kustannuksille olisi vuonna 2020 noin 100 miljardia euroa ja kustannukset tulisivat nousemaan jopa 250 miljardiin euroon vuonna 2050 EU:n tasolla. Esimerkiksi erilaiset sään ääri-ilmiöt voivat aiheuttaa yksittäisiä suuria kulueriä. On arvioitu, että Helsingissä talvella 2010-2011 lumentulo aiheutti arviolta jopa 14 miljoonan euron lisäkustannukset. Suomessa voi kuitenkin ilmaantua myös myönteisiä vaikutuksia joillekin toimialoille lyhyellä aikavälillä, sillä esimerkiksi aiempaa tuottavammat lajit ja erilaisten lajien käyttö maa- ja metsätaloudessa voi tuoda lisää tuottavuutta aloille. Myönteiset vaikutukset voivat kuitenkin kääntyä myös kielteiseksi, mikäli ilmasto jatkaa lämpenemistään, eikä muutosta saada pysäytettyä ja hillittyä. (Maa- ja metsätalousministeriö, 2014, s.14-15)

On kuitenkin arvioitu, että aluksi ilmaston lämpenemisellä tulee olemaan myönteisiä vaikutuksia Suomen talouteen. Joillakin aloilla, kuten maa- ja metsätaloudessa näkymät ovat myönteisiä ja vaikkei niiden osuus Suomen bruttokansasta ole kovin suuri, on niillä silti selvä merkitys, sillä kyseisten alojen tuotteita käytetään raaka-aineina myös metsä- ja elintarviketeollisuudessa. Lämpötilan nousulla voidaan saada pidempiä kasvukausia ja siirrettyä viljelyrajaa pohjoisemmaksi, minkä lisäksi hiilidioksidipitoisuuden kasvu voi parantaa maanviljelyn kannattavuutta. Myös metsätalous hyötyy, kun korkeampien lämpötilojen ja kasvukauden pidentymisen ennustetaan parantavan metsien kasvua. Lopulta rajusti nouseva lämpötila voi kuitenkin kääntyä Suomessakin haitaksi, jos esimerkiksi hyönteiset ja erilaiset tuholaiset yleistyvät. Lisäksi vaihtelevat sääolosuhteet ja maaperän vähäravinteisuus voivat osoittautua ongelmaksi. (Suomen Ympäristökeskus, 2021a)

Suomessa lämpenevä ilmasto voi myös vähentää lämmityskustannuksia, sillä energiantarve lämmityksessä voi vähentyä. Kesällä voidaan kuitenkin puolestaan tarvita enemmän energiaa viilennykseen, mutta ilmastoinnin tarpeen odotetaan kuitenkin pysyvän kohtuullisena Suomessa. Sateiden lisääntyminen ja lumisateiden korvautuminen vedellä voivat lisätä jokien virtausta sekä tulvia. Tuulisuus ja myrskyjen lisääntyminen voi tulla myös kalliiksi, kun esimerkiksi puita kaatuu. Tällaiset sääilmiöt voivat aiheuttaa ongelmia rakennuksille ja esimerkiksi tiestölle sekä muulle infrastruktuurille. (Suomen Ympäristökeskus, 2021a)

Taloudellisista vaikutuksista puhuttaessa herää myös kysymys siitä, kuka maksaa ilmastonmuutoksesta aiheutuvista kustannuksista, sillä useat analyysit ovat osoittaneet sen, että ilmastonmuutoksen kustannukset tulevat kasvamaan, mitä enemmän ilmaston lämpenee ja mitä myöhemmin päästövähennyksiä tehdään. Päästövähennysten lykkääminen johtaa yhä suurempiin päästöihin, mikä puolestaan vaatii kalliimpia sopeutumiskeinoja. Päästövähennyksien saavuttamiseksi tarvitaan erilaisia ohjelmia, joilla päästöjä pyritään vähentämään. Lisäksi päästöille pitää määritellä hinta liike-elämälle sekä kuluttajalle ja esimerkiksi hiilimaksut voivat ohjata poliittista päätöksentekoa. Tällaiset päätökset voivat myös ohjata esimerkiksi kuluttajan tai sijoittajan käyttäytymistä ja kannustaa ympäristöystävällisempiin yrityksiin sekä hiilineutraaleihin innovaatioihin. (Virtanen, 2011, s. 28-29)



### 2.1.2. Ilmastonmuutoksen sosiaaliset vaikutukset

Ilmastonmuutoksella on merkittäviä yhteiskunnallisia vaikutuksia, jotka tulevat ilmenemään niin ihmisten terveydessä kuin hyvinvoinnissakin, joko suoraan tai välillisesti. Esimerkiksi helleaaltojen aiheuttamat terveysongelmat tulevat mahdollisesti lisääntymään ja kylmyydestä aiheutuvat ongelmat puolestaan vähenemään. Talousvesi voi huonommissa tapauksissa pilaantua, jos rankkasateet yleistyvät ja aiheuttavat pintaveden joutumista kaivoihin. Myös erilaiset taudit voivat levitä esimerkiksi leviävien hyönteisten mukana. (Maa- ja metsätalousministeriö, 2014, s.15)

Sosiaalisten vaikutusten arviointia hankaloittaa se, että kokemukset vaikutuksista vaihtelee huomattavasti. Kokijana voi toimia yhteiskunta, yhteisö, perhe tai yksilö, jolloin erilaiset tilanteet ja eri asemassa olevat ihmiset kokevat ilmastonmuutoksesta aiheutuvat vaikutukset eri tavalla. Ilmastonmuutokseen liittyvät sosiaaliset vaikutukset voivat olla erittäin yleismaailmallisia ja liittyä esimerkiksi lämpenemiseen tai sateeseen, kuten aiemmin todettiin. Kun nämä vaikutukset kohdistuvat erilaisiin ihmisiin, joilla on erilaisia resursseja, voi seuraukset erota erittäin paljon toisen alueen seurauksista. (Kohl, 2011, s.197-198)

Suorien sosiaalisten vaikutusten lisäksi voi ilmaantua useita epäsuoria vaikutuksia, kuten toimeentulon muutoksia, taloudellista taantumaa, pakolaisuutta, poliittista epävakautta sekä turvattomuuden tunnetta. Ilmastonmuutoksen vaikutukset kohdistuvat herkemmin jo valmiiksi heikommassa asemassa oleviin ihmisryhmiin, jolloin heillä voi olla heikot mahdollisuudet ennakoida tai vaikuttaa ilmaston lämpenemisestä johtuviin muutoksiin sekä sopeutua niihin. Herkimprien ihmisryhmien tunnistaminen voi olla kuitenkin vaikeaa. Näiden seikkojen vuoksi sosiaalisia vaikutuksia on haastavampi tunnistaa, jolloin niistä syntyy myös laajempi ongelma. Poliittiset epävakaudet sekä erilaiset poikkeustilanteet aiheuttavat myös taloudellisia muutoksia ja tämä voi johtaa välillisesti esimerkiksi sosiaali- ja terveyspalveluiden rahoituksen vähenemiseen. (Haanpää et al., 2020, s. 37-38)

## 2.2. Ilmastomuutoksen hillintä ja siihen sopeutuminen

### 2.2.1. Ilmastomuutoksen hillintä

Ilmastomuutoksen hillinnällä tarkoitetaan sitä, että kasvihuonekaasupäästöjä vähennetään ja näin ollen saadaan hillittyä ilmaston lämpenemistä. Sopeutumisella puolestaan tarkoitetaan sitä, että elämistä valmistellaan tulevia muutoksia varten. Ilmastomuutoksen hillinnän kannalta tärkeintä on tavoitella vähähiilisyyttä. (Sachs, 2015, s. 418–419) Ilmaston muutosta ei voida enää perua lopullisesti, mutta sen hillintä on vielä mahdollista. Hillinnän kannalta tärkeitä keinoja ovat muun muassa energian säästämiseen ja energiatehokkuuden parantamiseen liittyvät keinot, uusiutuvien energiamuotojen käyttäminen, hiilinieluista huolehtiminen sekä luonnonvarojen ja resurssien kestävä käyttö. Jotta ilmastomuutosta voidaan hillitä, on teknologian kehityksellä erittäin suuri merkitys tässä työssä. (Ympäristöministeriö, 2017)

Ilmastomuutoksen hillintä vaatii kansainvälistä yhteistyötä, minkä vuoksi ilman kattavaa ja sitovaa ilmastosopimusta ei päästöjen vähennys onnistu. Ilmastomuutoksen hillintään on esitetty erilaisia ohjauskeinoja useiden tahojen toimesta. Niitä on esitelty niin YK:n ilmastosopimuksessa, Kioton pöytäkirjassa, Euroopan Unionissa sekä kansallisissa ilmasto-ohjelmissä. Tavoitteena kaikilla ohjauskeinoilla on kustannustehokkaat päästövähennykset, joiden toteutus eri toimialoilla vaihtelee, sillä erilaisuuden vuoksi yksi ohjauskeino ei sovi kaikille. Kansallisia ohjauskeinoja ovat puolestaan erilaiset hallinnolliset säädökset sekä taloudelliset ohjauskeinot, eli verot, tuet ja päästöoikeuskauppa. Suomen energia- ja ilmastostrategiassa esiteltyjä ohjauskeinoja ovat muun muassa päästökauppaan, lainsäädännön, verotuksen, maksujen sekä rahoitusten ja palveluiden kehittämiseen liittyvät keinot. (Aaltola & Ollikainen, 2011, s.123-124)

Energiaa voidaan säästää esimerkiksi lämmityksessä, jäähdytyksessä sekä ilmastoinnissa. Energiatehokkuutta voidaan puolestaan parantaa sähköistämisellä, esimerkiksi liikenteen osalta. (Sachs, 2015, s. 418–419) Energiatehokkuuden lisäksi toimet voidaan laajentaa ekotehokkuuden tasolle. Kuten energiatehokkuuden parantamisessakin, ekotehokkuutta parantamalla voidaan tuottaa palveluita tai tuotteita vähemmällä luonnonvarojen tai energian kulutuksella. Ongelmana kuitenkin on, että tuotteita ja palveluita tuotetaan jatkuvasti yhä enemmän, jolloin luonnonvarojen kokonaiskulutus voi kasvaa, vaikka tuotantotavat olisivat tehokkaampia ja kierrätystä lisättäisiin. (Berninger, 2012, s.26)

Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen sähköntuotannossa toimii myös yhtenä ilmastonmuutoksen hillintäkeinona. Sähköntuotannon hiilidioksidipäästöjen vähennys onnistuu hyödyntämällä uusiutuvia energialähteitä, kuten tuuli- ja aurinkovoimaa, joiden käyttö ei tuota päästöjä. Muita hiilidioksidipäästöttömiä sähköntuotantokeinoja ovat maalämpö, vesivoima ja ydinvoima. Samalla on tärkeää vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä sähköntuotannossa ja hyödyntää esimerkiksi hiilen varastointia sekä talteenottoa. (Sachs, 2015, s. 418–419) Esimerkiksi ruotsalainen sähkön ja lämmön tuottaja Vattenfall on asettanut tavoitteekseen olla fossiiliton yhden sukupolven aikana ja tavoitteena on nettonollapäästöt vuoteen 2040 mennessä niin yrityksen oman toiminnan kuin asiakkaidenkin toiminnan osalta. (Vattenfall, 2021)

Kolmas keino ilmastonmuutoksen hillintään liittyy aiempiin ja tärkeää onkin vaihtaa fossiilisia polttoaineita käyttävät laitteet ja menetelmät sellaisiin, että uusiutuvia ja puhtaampia energialähteitä voidaan hyödyntää. Polttomoottorit voidaan vaihtaa sähköisiin moottoreihin tai kattilat ja tulipesät voidaan vaihtaa ilmalämpöpumppuihin. Tällaisia muutoksia voidaan soveltaa useilla eri aloilla, niin teollisuudessa kuin kotitalouksissakin. Jotta muutokset vähentäisivät hiilidioksidin määrää, on kuitenkin tärkeää tuottaa sähköä ympäristöystävällisesti ja päästöttömistä energialähteistä. (Sachs, 2015, s. 418–419)

### 2.2.2. Green deal -sopimukset

Ympäristöministeriön Green deal -sopimuksilla tarkoitetaan vapaaehtoisia sopimuksia valtion ja elinkeinoelämän välillä. Tavoitteena on edistää kestävä kehityksen tavoitteita ja sopimusten avulla halutaan löytää ratkaisuja ilmastonmuutoksen hillintään sekä kiertotalouden edistämiseksi. Sopimusten valmistelu tehdään eri sopimusosapuolten välisellä yhteistyöllä ja sopimuksessa määritellään tavoitteet, niiden saavuttamiseksi tarvittavat toimenpiteet, sopimuskumppanien roolit sekä raportointi- ja seurantaprosessit ja niiden toteutustavat. Sopimuksen ominaisuuksilta edellytetään muun muassa, että niillä on ympäristön ja yhteiskunnan kannalta merkittäviä vaikutuksia, kunnianhimoisia tavoitteita, lisäarvoa nykytilaan verrattuna, verrattain nopeasti saavutettavia tuloksia sekä vahvaa vuorovaikutusta sopimusten osapuolien välillä. Lisäksi kehitetään erilaisia ratkaisu- ja toimintamalleja. Sopimuksia ei yleensä laadita yksittäisen yrityksen tai kunnan kanssa, vaan sen tulisi kattaa merkittävä osuus esimerkiksi koko toimialasta. Sopimuksissa ympäristöministeriö vastaa sopimusten seurannasta ja vaikuttavuuden



arvioinnista. Mikäli tavoitteita ei saavuteta, sopimus voidaan irtisanoa ja käyttää muita tarpeellisia ohjauskeinoja. (Bröckl et al., 2021, s. 114-115)

Vuonna 2016 solmittiin ensimmäinen Green deal -sopimus Kaupan liiton kanssa. Muovikassisopimuksessa tavoitteena oli, että vuoden 2025 vuoden lopussa muovikasseja käytettäisiin enää 40 kappaletta henkilöä kohden vuoden aikana. Seuraava sopimus tehtiin autoalan ja valtion välillä vuonna 2018. Siinä tavoitteena oli vähentää hiilidioksidipäästöjä. Kolmas sopimus vuonna 2019 koski valtakunnallista öljyjätehuoltoa ja sen kehittämistä, minkä tavoitteena oli öljyjätteen keräyksen tehostaminen ja kierrätyksen lisääminen koko Suomessa. Samana vuonna solmittiin myös sopimus työkonealalla ja tavoitteena oli vähentää työkoneiden aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. Vuonna 2020 solmittiin neljä sopimusta ja yhteensä Green deal -sopimuksia on tehty Suomessa kahdeksan. Kestävä purkaminen sovittiin Rakli ry:n kanssa, jonka tavoitteena on materiaalitehokkuuden edistäminen purkamisessa. Päästöttömät työmaat -kestävien hankintojen sopimus tavoittelee työmaiden päästöjen vähentämistä vuosiin 2025 ja 2030 mennessä. Haitallisten aineiden vähentäminen varhaiskasvatuksen hankinnoissa tähtää haitallisten kemikaalien vähentämistä varhaiskasvatuksen ympäristössä sekä lisäksi lasten kokonaiskemikaalialtistumisen vähentämistä. Rakentamisen muovit -sopimuksessa tavoitellaan rakentamisen toimitusketjun ja rakentamiseen käytettyjen kalvomuovien keräystä sekä kierrättämisen tehostamista. Lisäksi halutaan parantaa kierrätysmateriaalien hyödyntämistä esimerkiksi pakkauksiin sekä kalvomuovien tuotantoon. (Bröckl et al., 2021, s. 115-116)

### 2.2.3. Kioton pöytäkirja ja Pariisin ilmastopöytäkirja

Kioton pöytäkirja oli ensimmäinen laillisesti sitova kansainvälinen ilmastopöytäkirja, joka sisälsi myös määrälliset päästövähennystavoitteet. Se perustuu vuonna 1992 hyväksyttyyn YK:n laatimaan ilmastomuutosta koskevaan puitesopimukseen. Kioton sopimuksessa asetettiin tavoitteet teollisuusmaille ja se laadittiin vuonna 1997 Japanin Kiotossa. Tavoitteena oli, että kasvihuonekaasupäästöjä vähennettäisiin teollisuusmaiden osalta yhteensä 5,2 % vuoteen 1990 verrattuna. Tavoitekausi oli vuosina 2008-2012 ja mikäli jokin maa ei pääsisi tavoitteeseensa, sen olisi seuraavalla tavoitekaudella hyvitetävä puuttuvat vähennykset. Lisäksi maan tulisi tehdä 30 % lisävähennys eikä se saisi osallistua päästökauppaan. (Euroopan komissio, 2003)

Pariisin sopimus täydentää vuonna 1992 solmittua YK:n laatimaa ilmastonmuutoksen puitesopimusta. Pariisin sopimus solmittiin 12. joulukuuta vuonna 2015 ja se astui voimaan 4. marraskuuta 2016. Toimeenpanoa koskeva säännöstö hyväksyttiin puolestaan joulukuussa vuonna 2018 Katowicessa ja säännöt koskevat kaikkia sopimuksen osapuolia. Sopimus koskee vuoden 2020 jälkeistä aikaa. Kaikilta mailta odotetaan merkittäviä ja kunnianhimoisia toimia ilmastonmuutosta vastaan ja näitä toimia on kiristettävä ajan myötä, jotta tavoitteisiin olisi mahdollista päästä. Määrällisiä päästövähennyksiä ei ole sisällytetty sopimukseen, vaan osapuolet sitoutuvat itse valmistelemaan ja tiedottamaan sekä ylläpitämään ja saavuttamaan kansalliset päästötavoitteensa. Kehittyvien maiden osalta on sovittu tiettyjä joustoja. (Ympäristöministeriö, 2021b; Ympäristöministeriö, 2017a)

Pariisin ilmastopimuksen tavoitteena on pyrkiä siihen, että maapallon keskilämpötilan nousu pysyisi selvästi alle kahdessa celsiusasteessa ja samalla tavoitellen vain 1,5 asteen nousua. Tämän lisäksi sopimuksella pyritään parantamaan osapuolten kykyä sopeutua ilmastonmuutokseen eikä vähähiilisyyden edistäminen saa vaarantaa ruokaturvaa. (Ympäristöministeriö, 2017, s. 24) Jotta Pariisin sopimuksen tavoite voitaisiin saavuttaa, pyritään saamaan kasvihuonekaasupäästöt laskuun mahdollisimman pian ja näin ollen saavuttaa tasapaino ihmisten aiheuttamien päästöjen ja hiilinielujen välillä. Näiden välinen tasapaino tulisi saavuttaa tämän vuosisadan jälkipuoliskolla. Tasapainolla tarkoitetaan sitä, että nielut poistavat hiiltä ilmakehästä yhtä paljon kuin ihmistoiminta aiheuttaa ilmakehään. Ihmisperäisten päästöjen sekä nielujen välinen erotus, eli nettopäästötase, olisi nolla. Jotta tämä tasapaino voitaisiin saavuttaa, tulee päästöjä vähentää ja vastaavasti nieluja suojella ja vahvistaa. (Hildén et al., 2019)

#### **2.2.4. Sopeutuminen ilmastonmuutokseen**

Sopeutumisella tarkoitetaan sitä, miten eri yhteisöt, yhteiskunnat ja ekosysteemit mukautuvat ilmastonmuutokseen. Sopeutuminen voi tapahtua etuja hyödyntämällä tai minimoimalla erilaisia haittoja. Kun puhutaan ihmisyyhteisöistä, tavoitteena on vähentää eri alueiden haavoittuvuutta. Tärkeintä on löytää estäviä toimenpiteitä sekä ennakoida lähtökohtia yhteisötasolla. Jotta sopeutuminen onnistuisi, tarvitaan paljon tietoa ja ymmärrystä sekä ilmastonmuutoksen aiheuttamista suorista että epäsuoristakin vaikutuksista. (Kohl, 2011, s.197)

Sopeutumista on pohdittava monen yhteiskunnallisen ja ympäristöllisen tekijän kannalta. Yhteiskunnan kehitykseen ja sen sopeutumiskykyyn vaikuttavia tekijöitä on listattu taulukossa 1. Erilaiset väestötekijät, taloudellinen kehitys, hyvinvointi, ympäristötekijät ja luonnon varat ovat merkittävä osa sopeutumista. Lisäksi yhteiskunnan ja talouden yleinen vakaus, hyvin rakennettu ja ylläpidetty sekä kestävä ympäristö, muun infrastruktuurin toimivuus, hallinto, koulutustaso sekä innovaatioihin ja teknologiaan panostaminen auttavat muutoksiin sopeutumisessa. Sopeutuminen voi vaatia myös suuria investointeja, mikä voi aiheuttaa ongelmia köyhemmille alueille. (Maa- ja metsätalousministeriö, 2014, s.18)

Taulukko 1: Sopeutumisen kannalta merkittäviä yhteiskunnallisia ja ympäristöllisiä tekijöitä (Maa- ja metsätalousministeriö, 2014, s.18)

|  |
|--|
| <b>Väestötekijät:</b> väestörakenteen kehitys sekä väestön kasvu ja jakautuminen   |
| <b>Taloudellinen kehitys:</b> BKT, tuottavuus, alueellinen sekä rakenteellinen jakautuminen, köyhyys, kaupan kansainvälisyys sekä ruokaturva     |
| <b>Hyvinvointi:</b> inhimillinen kehitys, koulutustaso ja terveys  |
| <b>Ympäristötekijät:</b> veden, ilman ja maaperän kunto sekä ekosysteemien toiminta  |
| <b>Luonnonvarat:</b> uusiutuvat energialähteet sekä muut tärkeät luonnonvarat, kuten metsä   |
| <b>Instituutiot ja hallinta:</b> paikallisten, alueellisten ja kansallisten instituutioiden tila, ihmisten osallistuminen sekä sääntely          |
| <b>Teknologian kehitys:</b> kehityksen nopeus ja suunta, innovaatiot ja niiden leviäminen  |
| <b>Yleiset yhteiskunnalliset tekijät:</b> ihmisten elämäntavat ja suhtautuminen ympäristökysymyksiin sekä erilaiset yhteiskunnalliset jännitteet |
| <b>Politiikka-aleuiden kehitys:</b> sektoripolitiikkojen kehitys, toimeenpano ja vaikuttavuus  |



Maa- ja metsätalousministeriö on asettanut Suomen sopeutumisen päämäärän seuraavasti: ”Suomalaisella yhteiskunnalla on kyky hallita ilmastonmuutokseen liittyvät riskit ja sopeutua ilmastossa tapahtuviin muutoksiin.” Tämän pohjalta on asetettu kolme tavoitetta, jotka pitäisi saavuttaa vuoteen 2022 mennessä. Ensimmäinen tavoite on, että sopeutuminen on sisällytetty osaksi toimialojen sekä toimijoiden suunnittelua ja toimintaa. Tällä pyritään parantamaan sopeutumisen läpileikkaavuutta sekä kustannustehokkaampia toimia. Toinen tavoite on, että toimijoilla on käytössään tarvittavat menetelmät, jotta he voivat tehdä ilmatoriskien arviointi- ja hallintamenetelmiä. Kolmas tavoite on, että tutkimus- ja kehitystyöllä, viestinnällä ja koulutuksella lisätään yhteiskunnan sopeutumiskykyä. Lisäksi saadaan kehitettyä innovatiivisia ratkaisuja ja lisätty kansalaisten tietoisuutta ilmastonmuutokseen sopeutumisesta. (Maa- ja metsätalousministeriö, 2014, s.20-24)

### **2.3. Hiilineutraaliustavoite**

Hiilineutraalius voidaan määritellä esimerkiksi sen mukaan, että jokin taho, kuten valtio, yritys tai toiminto, tuottaa päästöjä vain sen verran kuin se pystyy sitomaan. Eli esimerkiksi yrityksen toiminto tuottaisi päästöjä hyvin vähän ja syntyneet päästöt voidaan hyvittää jollakin muulla tavalla erilaisten päästövähennyskeinojen avulla. Toisen määritelmän mukaan riittäisi, että päästöjen vähennyksen ansiosta ilmastonmuutos ei enää kiihtyisi enempää. Hiilinegatiivisuudella tarkoitetaan puolestaan sitä, että ilmakehästä poistetaan enemmän hiiltä, kun sitä vapautuu. Hiilinegatiivisuus vaatii erilaisia keinoja, kuten metsitystä tai hiilen sidontaa esimerkiksi CCS-teknologian avulla. Näiden avulla ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta voidaan vähentää, jotta hiilinegatiivisuus voitaisiin saavuttaa, vaaditaan aluksi päästöjen vähennystä sekä hiilineutraaliuden saavuttamista. (Berninger, 2012, s.18-20)

Vuonna 2019 Suomen hallitus ilmoitti, että tavoitteena on sellaiset toimet, joilla Suomi on hiilineutraali vuonna 2035. Hiilinegatiivisuus haluttaisiin saavuttaa mahdollisimman pian sen jälkeen. Linjauksen jälkeen laadittiin yhteensä 13 tiekarttaa yhteistyössä toimialojen kanssa, joiden tuli olla mahdollisimman kunnianhimoisia, mutta kuitenkin realistisia ja tavoitettavissa. Tiekartat sisältävät tyypillisesti nykytilan kuvauksen, arvion päästövähennyksiin liittyvistä teknologioista ja keinoista, sekä arvio siitä, millaisia päästövähennyksiä olisi mahdollista saavuttaa. Toteutus vaatii kuitenkin merkittäviä

investointeja ja myös nämä on tyypillisesti esitelty joko numeerisesti tai sanallisesti tiekartoissa. (Paloneva & Takamäki, 2020, s.9-11)

Kuluvana vuonna 2021 hallituksen puoliväli- ja kehysriihessä arvioitiin, että hiilineutraaliuden saavuttaminen Suomessa vaatisi vielä 11 miljoonan tonnin lisätoimia, jotta hiilineutraalius voitaisiin saavuttaa. Kokonaispäästöt vuonna 2019 olivat noin 52,1 miljoonaa tonnia. Nykyisillä toimilla saavutetaan 19 miljoonan tonnin päästövähennykset ja energiaverouudistuksen ennakoidaan tuovan vielä kahden miljoonan tonnin vähennyksen. Hallitus on sitoutunut lisätoimien päättämiseen, jotta hiilineutraalius voitaisiin saavuttaa vuoteen 2035 mennessä. Nämä lisätoimet tulisivat liittyvän esimerkiksi öljylämmityksestä luopumiseen, teollisuuden tiekarttoihin, kaukolämmön vähähiilisyyteen, maatalouden ja työkaluiden lisätoimiin. Lisäksi liikenteen päästöt halutaan puolittaa 2030 vuoteen mennessä ja hiilivapaa liikenne saavuttaa vuonna 2045. Fossiilisista polttoaineista tullaan luopumaan ja ylipäätään kestävä kasvun ohjelmaan halutaan panostaa, jotta investointeja saataisiin vauhditettua. (Valtioneuvosto, 2021, s.22)

Hiilineutraaliuteen voidaan pyrkiä erilaisilla keinoilla. Ilmastomuutoksen hillintää käsittelevässä kappaleessa esiteltyjä keinoja voidaan hyödyntää myös hiilineutraaliuteen pyrittäessä. Yhtenä hyvänä työkaluna hiilineutraaliutta tavoitellessa toimii myös hiilijalanjälkilaskenta. Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan jonkin tuotteen, palvelun, henkilön, paikkakunnan tai organisaation aiheuttamaa kuormitusta ilmastolle. Hiilijalanjälkilaskenta perustuu elinkaaritarkasteluun, mutta laskentamenetelmät voivat erota toisistaan esimerkiksi tarkastelua rajattaessa ja elinkaarivaiheiden sisällyttämisessä laskentaan. (Berninger, 2012, s.30-31) Hiilijalanjälkeä tarkastellaan tarkemmin myöhemmin tässä työssä.

Tämän lisäksi erilaiset ilmastostrategiat sekä ilmastolait toimivat ohjauskeinoina kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa. Ilmastostrategialla voidaan määrittää päästövähennystavoitteet sekä keinot, joilla ne saavutetaan. Sillä saadaan herätettyä keskustelua ja lisättyä ihmisten tietoisuutta ilmaston lämpenemisestä. Suomen valtiolla, useilla maakunnilla ja kunnilla on omat strategiansa, jotka koskevat ilmastomuutosta. Ilmastolailla puolestaan voidaan saada sitovat päästövähennystavoitteet valtiolle. (Berninger, 2012, s.32&36) Suomessa ilmastolaki laadittiin toukokuussa 2015 ja lain tarkoituksena on vahvistaa puitteet Suomen ilmastopolitiikan suunnittelulle ja sen toteutumisen seurannalle. Lisäksi tarkoituksena on tehostaa ja sovittaa yhteen valtion

viranomaisten toimintaa, jotta ilmastonmuutosta saadaan hillittyä. Myös sopeutumiseen tähtäävien toimenpiteiden suunnittelun ja täytäntöönpanon seurausta halutaan tehostaa ja sovittaa, minkä lisäksi eduskunnan ja yleisön osallistumis- ja vaikuttamismahdollisuuksia halutaan parantaa. (Finlex, 2015)

Talouden ohjauskeinoilla voidaan myös viedä yhteiskuntaa kohti hiilineutraaliutta. Niiden avulla voidaan tukea energiatehokasta toimintaa, kannustaa uusiutuvien energialähteiden käyttöön tai muiden hiilineutraaleihin ratkaisuihin. Tällaisia ohjauskeinoja ovat esimerkiksi energia- ja hiilidioksidiverotus tai autovero, joka suosii vähäpäästöisempiä autoja. Energiaverotuksen avulla pyritään hillitsemään energiankulutusta ja ohjata puolestaan käyttämään uusiutuvia energialähteitä, jotta päästöjen määrä pieneneisi. (Berninger, 2012, s. 39)



### 3. TYÖKALUJA ILMASTONMUUTOKSEN HILLINTÄÄN

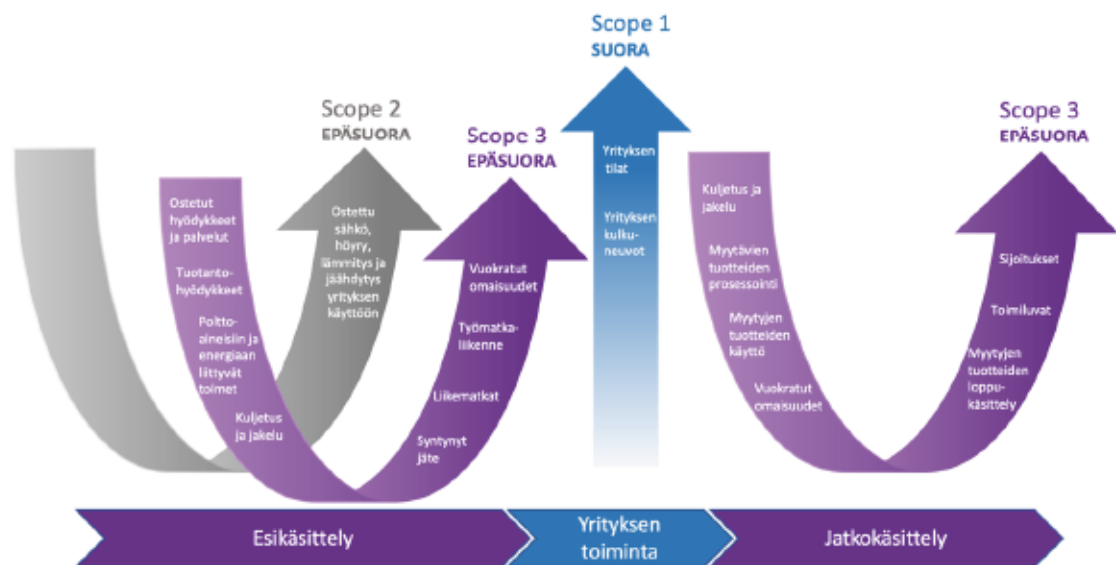
#### 3.1. Elinkaariarviointi

Elinkaariarvioinnissa, eli LCA:ssa (life cycle assessment), on kyse menetelmästä, jossa analysoidaan ja arvioidaan jonkin tuotteen tai palvelun vaatimia resursseja ja aiheuttamia ympäristövaikutuksia. Elinkaariarvioinnin laajuus voidaan määritellä eri tavoin, mutta täydellisessä elinkaareissa on mukana kaikki vaiheet aina raaka-aineiden tai materiaalien hankinnasta hylkäämiseen saakka. Mukana on siis luonnosta hankittavat raaka-aineet, niiden vaatima prosessointi ja kuljetus tuotantolaitokselle, itse tuotteen valmistus, jakelu käyttö, uudelleenkäyttö, huoltotoimenpiteet sekä kierrätys ja hylkäys. Tällainen täydellinen elinkaariarviointi on kuitenkin erittäin työlästä ja aikaa vievää, joten arvioinnista saatetaan karsia joitakin vaiheita pois tai siinä voidaan keskittyä esimerkiksi tiettyjen päästöjen tarkasteluun. (Suomen ympäristökeskus, 2017)

Elinkaariarvioinnin pohjalla ovat kansainväliset ISO-standardit: ISO 14040 sekä ISO 14040. Näiden mukaisesti elinkaariarviointi voidaan jakaa neljään vaiheeseen. Ensimmäisenä on tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, jossa määritellään muun muassa tavoitteet, arvioinnin syyt, yksityiskohdat, tarkasteluajanjakso sekä tulosten hyödyntäjät ja raportoinnin vaatimukset. Lisäksi erilaiset rajoittavat tekijät selvitetään ja tämän määrittelyvaiheen huolellinen suorittaminen selkeyttää ja tehostaa arviointia ja sen suorittamista. Toisessa vaiheessa tehdään inventaarioanalyysi, jossa kerätään tarvittavat tiedot koko tuotejärjestelmästä. Näin ollen saadaan selville materiaali- ja energiavirrat, joilla saadaan kuvattua tuotteen elinkaari. Inventaarioanalyysin laajuus määräytyy sen mukaan, miten arviointia sovelletaan sekä mitkä ovat analyysin tavoitteet. Inventaarioanalyysissä on mukana vähintään kaikki keskeisimmät yksikköprosessit. Kolmas vaihe on vaikutusarviointi, jonka tavoitteena on selvittää haitalliset toimet tai päästöt ja niiden vaikutus esimerkiksi ihmisten terveyteen, luontoon ja luonnonvaroihin. Neljännessä, eli viimeisessä vaiheessa, käydään läpi analyysin tulokset ja tulkitaan niitä. Tällöin tehdään johtopäätökset ja toimenpidesuosituksset sen mukaan, millaisia tuloksia on saatu. (Suomen ympäristökeskus, 2017)

### 3.2. GHG-protokolla

Vuonna 1998 käyttöön otettu GHG-protokolla (Greenhouse Gas Protocol) on maailmanlaajuisesti käytössä oleva ohjeistus ja standardi kasvihuonekaasujen laskemiseen sekä niiden vähentämiseen. Se tarjoaa ohjeistuksen lisäksi työkaluja ja koulutusta yrityksille sekä hallituksille. Protokolla on kehitetty yhteistyössä WRI:n (World Resources Institute) ja WBCSD:n (World Business Council for Sustainable Development) kanssa. (Greenhouse Gas Protocol, 2021)



Kuva 2. GHG-protokollan mukaiset päästöt (mukaiillen Barrow et al., 2013, s.6)

GHG-protokolla perustuu siihen, että päästöt jaotellaan suoriin ja epäsuoriin. Suorat päästöt ovat peräisin toimivan yrityksen omistamista tai kontrolloitavista toiminnoista, kuten tuotannon sivuvirroista tai palamisesta aiheutuvista päästöistä. Epäsuorat päästöt seuraavat kyllä yrityksen toiminnasta, mutta ovat saaneet alkunsa jonkun toisen yrityksen toiminnasta. (Bhatia et al., 2011, s.27-28) GHG-protokollan mukaisesti nämä päästöt voidaan jakaa kolmeen osaan, joita englannin kielessä nimitetään Scope 1, Scope 2 ja Scope 3 -ryhmiin. Tämä jaottelu on esitetty kuvassa 2 ja kuten siitä nähdään, Scope 1 -ryhmä käsittää suorat päästöt, joita syntyy yrityksen omassa toiminnassa. Mikäli yrityksen toiminnassa käytetään itsetuotettua energiaa, lämpöä tai höyryä, kuuluvat näistä toiminnoista syntyneet päästöt Scope 1 -ryhmään. Myös erilaiset fysikaaliset tai kemialliset prosessit ja niistä syntyvät jätteet, tuotteet, välituotteet ja muut päästöt

luokitellaan tähän ryhmään. Näiden lisäksi myös työntekijöistä aiheutuvat päästöt on otettava huomioon ja luokiteltava Scope 1 -ryhmään. (Bhatia et al., 2011, s.28-29, Bhatia, et al., 2001, s. 27)

Scope 2 -ryhmä kattaa puolestaan osan epäsuorista päästöistä, jotka ovat seurausta organisaation toiminnasta, mutta todellisuudessa syntyvät jossain muualla, kuten sähköntuottajan laitoksessa. Scope 2 -ryhmään kuuluu yrityksen ostaman energian- tai sähköntuotannon synnyttämät päästöt sekä jäähdytyksestä tai lämmityksestä syntyvät päästöt. Monille yrityksille nämä ovat merkittävä osuus kokonaispäästöjen tarkastelussa, mutta myös vaikutusmahdollisuudet niiden pienentämiseen voivat olla huomattavia. (Sotos, 2015, s.6) Sähkönkäytön päästöjä voidaan pienentää esimerkiksi energiatehokkaammilla laitteilla ja vaihtamalla ostettu sähkö uusiutuvilla lähteillä tuotettuun. Lisäksi sähköntuotantoa voidaan tuottaa itsenäisesti esimerkiksi investoimalla aurinkoenergiaan tuotantoalueella. (Bhatia et al., 2011 s.28-29, Bhatia et al., 2001 s. 27)

Scope 3 puolestaan käsittää kaikki muut epäsuorat päästöt, joita yrityksen arvoketjussa esiintyy, esimerkiksi tuotteen elinkaaren aikana. Näytä päästöjä esiintyy niin esikäsittelyvaiheessa kuin jatkokäsittelyvaiheessakin, eli ylävirran ja alavirran aikana. Kuten kuvasta 2 nähdään, Scope 3 -ryhmän esikäsittelyvaiheeseen kuuluvat esimerkiksi ostetut hyödykkeet ja palvelut sekä niiden aiheuttamat päästöt, esimerkiksi raaka-aineen hankintaan liittyvä louhinta tai tuotanto sekä kuljetus. Lisäksi tähän ryhmään lasketaan energiaan tai polttoaineisiin liittyvät toiminnot, jotka eivät sisälly Scope 1 tai 2 -ryhmiin. Myös erilaiset kuljetukseen ja jakeluun sekä syntyvään jätteeseen liittyvät päästöt sisällytetään tähän ryhmään. Työntekijöiden tekemät liikematkat sekä työmatkat kodin ja työpaikan välillä lasketaan Scope 3 -ryhmään. Erilaiset vuokratut laitteet, tilat tai muut palvelut, joita yritys hyödyntää, lasketaan tähän ryhmään mukaan. (Barrow et al., 2013, s.7-8)

Jatkokäsittelyyn, eli alavirtaan liittyvät päästöt sisältävät jälleen valmiin tuotteen kuljetukseen ja jakeluun liittyvät päästöt. Tuotteen valmistukseen liittyvät päästöt sekä tuotteiden käyttöön liittyvät päästöt lasketaan Scope 3 -ryhmään. Kun tuote on tullut elinkaarensa päähän, sen loppukäsittelystä syntyy vielä päästöjä, kun se hävitetään tai käsitellään muulla tavalla. Myös alavirrassa voi olla mukana erilaisia vuokrattuja tai lainattuja laitteita tai palveluita, minkä lisäksi erilaiset franchise-toiminnot, toimiluvat sekä sijoitukset kuuluvat Scope 3 -ryhmään. (Barrow et al., 2013, s.9-10)



### 3.3. Hiilijalanjälki – negatiivisten ilmastovaikutusten mittari

Aiemmin tässä työssä esiteltiin hiilijalanjälki yhtenä työkaluna ilmastonmuutoksen hillinnässä ja apuna kohti hiilineutraaliutta. Hiilijalanjälki terminä kuvaa esimerkiksi prosessissa syntyneitä päästöjä, erityisesti hiilidioksidia ja muita kasvihuonekaasuja. Hiilijalanjälki voi siis olla jonkin tuotteen, palvelun tai organisaation aiheuttama ilmastokuormitus. Yksikkönä hiilijalanjäljessä käytetään yleensä hiilidioksidiekvivalenttia, CO<sub>2</sub>-ekv., sillä sen avulla voidaan kuvata kaikkien kasvihuonekaasujen ilmastovaikutusta yhdessä. Hiilijalanjälkeä laskettaessa perustana on elinkaaritarkastelu. Täydelliseen laskentaan, jossa huomioidaan esimerkiksi tuotteen koko elinkaari, sisällytetään kaikki vaiheet. Kyseessä on niin kutsuttu ”kehdestä hautaan” -analyysi, jossa on mukana:

- raaka-aineiden aiheuttama hiilijalanjälki
- prosessiin käytettävä energia
- kiinteistöihin kuluva energia
- tuotteiden pakkaus
- tuotteen kuljetus
- jätteet, puhdistukset sekä muut avustavat prosessit
- kuluttajan loppukäyttö
- tuotteen lopullinen hävittäminen

Kuitenkin eri laskentamenetelmät voivat rajata elinkaaren eri vaiheita laskennan ulkopuolelle. (Berninger, 2012, s. 30-31; Kemp & Lim, 2020, s.20 & 30)

Hiilijalanjäljestä on tullut yleisesti käytetty termi ja ilmastonmuutoksen mittari. Tuotteita mainostetaan sen avulla, sillä mitä pienempi hiilijalanjälki on, sitä parempana tuotetta tai palvelua voidaan pitää. (Pohjola, 2011, s.339) Hiilijalanjälki helpottaa ilmastovaikutusten tunnistamista ja pienentämistä. (Rinne, 2011, s.315) Tänä päivänä yritykset työskentelevät kovasti ympäristöystävällisemmän toiminnan puolesta ja hiilijalanjälkeä pyritään pienentämään jatkuvasti. Resursseja ja luonnonvaroja käytetään tehokkaammin, minkä lisäksi jätteiden ja päästöjen määrää pyritään pienentämään. Sivuvirtoja halutaan käyttää hyväksi mahdollisimman paljon, jotta jätteen määrä vähenisi. Tyypillisesti selvitetäänkin tuotteen tai yrityksen negatiivisia ympäristövaikutuksia, kuten hiilijalanjälkeä. (Grönman et al., 2018, s.7-8)

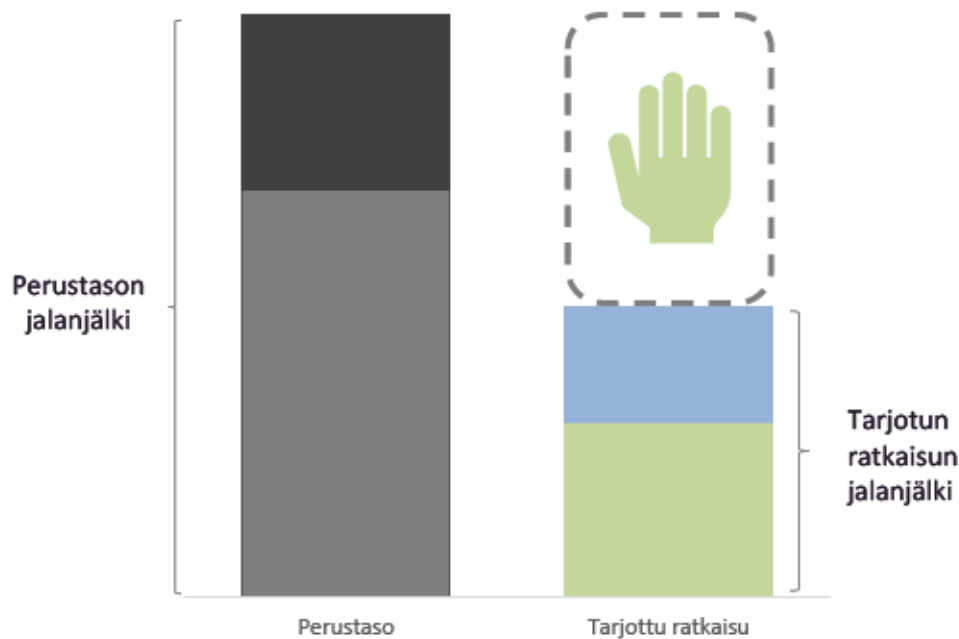


### **3.4. Hiilikädenjälki – uusi mittari positiivisten ilmastovaikutusten arviointiin**

Negatiivissävyytteisen hiilijalanjäljen rinnalle on haluttu tuoda jokin keino, jolla voidaan viestittää yrityksen positiivisista ilmastovaikutuksista. Hiilikädenjäljen tarkoituksena on kertoa tuotteen positiiviset vaikutukset ympäristön hyväksi. Kun hiilijalanjäljen kohdalla tarkoituksena on pienentää haitallisia vaikutuksia mahdollisimman lähelle nollaa, hiilikädenjäljen kohdalla saavutukset ovat lähes rajattomat. Erityisesti tarkoituksena on tuottaa tuotteita, joita hankkimalla kuluttajat voivat vähentää omia kasvihuonekaasupäästöjään. (Grönman et al., 2018 s.9) VTT ja LUT, eli Lappeenrantaan Lahden teknillinen yliopisto, ovat määritelleet hiilikädenjälkeä seuraavasti: ”Kädenjäljellä viitataan myönteisiin ympäristövaikutuksiin, joita yritykset voivat saavuttaa tarjoamalla sellaisia tuotteita tai muita ratkaisuja, jotka pienentävät asiakkaiden hiilijalanjälkeä.” eli yrityksen hiilikädenjälki on sitä suurempi, mitä enemmän heidän tuotteillaan voidaan pienentää asiakkaiden hiilijalanjälkeä ja haitallisia ympäristövaikutuksia. (Behm et al., 2018, s.9) Menetelmää on tarkennettu ja laajennettu, jolloin hiilikädenjäljestä on tullut myös ympäristökädenjälki. Tämän ansiosta se kattaa ympäristövaikutukset laajemminkin, kuten ilmanlaadun, ravinteet, resurssit ja veden. Lisäksi sen soveltaminen niin yritys- kuin hanketasollakin on helpompaa. (VTT, 2021)

Iso-Britanniassa on esitelty vuonna 2015 termi ”Carbon brainprint”, eli suomeksi termi voisi olla hiiliaivojälki, jonka tarkoituksena on kuvata yliopistojen vaikutusmahdollisuuksia hiilidioksidipäästöjen vähennykseen. Yliopistoilla olisi siis mahdollista osallistua organisaatioiden ja yritysten päästövähennyksiin osaamisellaan ja tutkimustyöllään. Tutkittavia teknologioita kehittämällä ja tarjoamalla yritysten käyttöön sekä tarjoamalla muutenkin tietoja ja taitoja päästövähennysten toteutukseen yliopistot voisivat vaikuttaa ilmastonmuutokseen ja kasvattaa omaa hiiliaivojälkeään. Hiiliaivojälki ei toimi kompensationsa yliopiston aiheuttamiin päästöihin, mutta se tarjoaa kuitenkin yliopistoille uuden menetelmän arvioida ja osoittaa niiden vaikutusmahdollisuuksia ilmastonmuutoksen vastaisessa työssä. Kuitenkin tämä hiiliaivojälki, jota tässä työssä kutsutaan hiilikädenjäljeksi, vaatii vielä lisämäärittelyjä ja erityisesti yliopistojen osalta sen määrää tulevaisuudessa on vaikea arvioida tarkasti. Tämän vuoksi voidaankin puhua mahdollisesta aivojäljestä, jonka merkitys ja suurus määräytyvät teknologian käyttöönotosta tulevien vuosien aikana. (Bernon et al., 2015) Selkeyden vuoksi tässä

työssä puhutaan jatkossa mahdollisesta hiilikädenjäljestä, jota yliopistolla tehtävä tutkimustyö voi kasvattaa.



Kuva 3. Hiilikädenjäljen muodostuminen perustason hiilijalanjäljen ja tarjotun ratkaisun hiilijalanjäljen erotuksena (Behm et al., 2021, s.14)

Kädenjälki voi muodostua kahdella tavalla: joko voidaan välttää tai ennaltaehkäistä hiilijalanjäljen syntyminen tai luodaan positiivinen vaikutus, jota muuten ei esiintyisi. Kuvassa 3 on esitetty vertailu perustason hiilijalanjäljen ja uuden ratkaisun jalanjäljen välillä. Kuten kuvasta nähdään, uudella ratkaisulla voidaan pienentää hiilijalanjälkeä, jolloin perustason ja uuden ratkaisun välinen erotus on syntyvä hiilikädenjälki (Behm et al., 2021, s. 14 & 25), eli:

$$\text{Kädenjälki}_{\text{Tuote, palvelu}} = \text{Jalanjälki}_{\text{Lähtötaso}} - \text{Jalanjälki}_{\text{Uusi ratkaisu}}$$

Hiilikädenjälki ei kuitenkaan suoraan tarkoita vain hiilijalanjäljen pienentämistä, vaan tilanteessa tuotteen tai yrityksen toiminnan pitäisi tuottaa jotain parempaa kuin vain esimerkiksi poistaa oman tuotteen hiilidioksidipäästö. Gregory Norris on julkaisussaan käsitellyt asiaa siitä näkökulmasta, ettei omia sotkuja siivoamalla voi saavuttaa kunniaa, vaan tarkoituksena olisi luoda enemmän hyvää kuin huonoa. (Norris, 2015) Vaikka hiilijalanjälki ja -kädenjälki vaikuttavat vastakohdilta, voi niitä tarkastella myös toisiaan täydentävinä ajattelutapoina. Taulukossa 2 on esitelty, kuinka hiilikädenjäljen avulla

saadaan lisäratkaisuja ympäristöhaasteisiin. Kuten taulukosta nähdään, hiilijalanjäljellä pyritään kierrättämään ja uudelleenkäyttämään jo olemassa olevia materiaaleja ja resursseja. Hiilikädenjälki pyrkii puolestaan ennallistamaan tilannetta, esimerkiksi kasvattamalla lisää metsää kaadetun tilalle. Hiilijalanjälki mittaa negatiivisia vaikutuksia ja toimii varoittavana tai nuhtelevana määreenä, kun hiilikädenjälki pyrkii vaikuttamaan positiivisesti ja inspiroimaan. (Biemer et al., 2013)

Taulukko 2: Vertailu hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen välillä (Biemer et al., 2013)

| <b>Hiilijalanjälki</b>   | <b>Hiilikädenjälki</b>  |
|--|---|
| Aiheutetut haitat (The harm we do)   | Aiheutetut hyödyt (The good we do)                                  |
| Rajalliset resurssit<br>(Limited resources)                                  | Rajoittamaton potentiaali<br>(Unlimited potential)                  |
| Vähennys / Uudelleenkäyttö /<br>Kierrättäminen<br>(Reduce / Reuse / Recycle) | Elpyminen / Ennallistaminen<br>(Recover / Restore)                  |
| Nuhtelu (Admonish)   | Vaikutus / Koulutus / Inspiointi<br>(Influence / Educate / Inspire) |
| Mitattavat suureet (Measure quantities)                                      | Laskun loppuunsaattaminen (Count<br>accomplishments)                |
| Laskettava (Calculate)   | Ylistävä (Appreciate / Celebrate)                                   |
| Vastustaa hävittämistä / tuhoamista<br>(Resist destruction)                  | Kannattaa suojelua (Advocate protection)                            |
| Ratkaisukeskeinen (Problem solving)  | Yritteliäisyys (entrepreneurism)                                    |

Hiilikädenjälki voi muodostua tuotteen eri osa-alueista, kuten tehokkaammasta materiaalien ja energian käytöstä. Jos uusiutumattomia tai paljon päästöjä aiheuttavia materiaaleja voidaan korvata paremmilla materiaaleilla tai niiden käyttöä voidaan vähentää, saadaan kädenjälkeä kasvatettua. Sama tilanne on energiankäytössä, jolloin tehokkaammilla prosesseilla tai vähemmän energiaa kuluttavilla prosesseilla saadaan

pienennettyä hiilijalanjälkeä lähtötasoon verrattuna. Jätteen määrän vähentyminen sekä paremmat kierrätys ja uudelleenkäyttömahdollisuudet voivat toimia hiilijalanjälkeä pienentävänä vaikutuksena. Tuotteen elinkaaren pidentyminen esimerkiksi käyttöiän pidentämisellä tai suorituskyvyn parantamisella mahdollistaa hiilikädenjäljen kasvattamisen. Lisänä niin elinkaaren pidentämiseen kuin tehokkaaseen materiaalinkäyttöön liittyen myös sivuvirtojen hyödyntäminen ja niiden käytön tehostaminen voivat olla osa hiilijalanjäljen pienentämistä. Vielä yhtenä keinona on se, että tuote tai ratkaisu voi toimia hiilinieluna tai varastoida hiiltä itseensä ja näin ollen jälleen kasvattaa hiilikädenjälkeä. (Behm et al., 2021, s. 13-14)

Hiilikädenjälki voi toimia markkinointikeinona, sillä sen selvittäminen ja avoin viestintä voi herättää myös asiakkaan mielenkiinnon. Hiilikädenjäljen perustuessa siihen, että yrityksen toiminnan ansiosta asiakkaalle tarjoutuu mahdollisuus pienentää omaa hiilijalanjälkeään voi se houkutella asiakkaita vaihtamaan kyseiseen tuotteeseen. Tämän takia viestintä yrityksen hiilikädenjäljestä tulisi suunnitella huolellisesti. Usein hiilikädenjälki ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalenttina, kuten hiilijalanjäljessäkin. (Grönman et al., 2018, s.22) Hiilidioksidiekvivalentti sisältää kasvihuonekaasut eli hiilidioksidin ( $\text{CO}_2$ ) lisäksi myös metaanin ( $\text{CH}_4$ ) ja typpioksiduulin ( $\text{N}_2\text{O}$ ), minkä lisäksi siinä huomioidaan myös niiden globaali ilmastoa lämmittävä vaikutus (global warming potential GWP) (eurostat, 2017)

Hiilikädenjälkeen liittyvässä viestinnässä on hyvä ottaa huomioon useita seikkoja. Terminä hiilikädenjälki on melko uusi, mutta myös elinkaariarviointi ja hiilijalanjälki voivat olla vielä tuntemattomia termejä osalle kuulijakunnasta. Lisäksi laskelmat ja niiden tulokset olisi hyvä viestiä selkeästi sekä selvittää, millaisilla keinoilla päästöjen vähennys saadaan toteutettua. (Grönman et al., 2018, s. 23) Jotta kädenjälkeen liittyvä viestintä olisi riittävän selkeää, on erittäin tärkeää määrittää ja kertoa se, miten kädenjälkilaskelmiin on päästy. Lasketun kädenjäljen määrä ja sen viiteyksikkö pitää tuoda esiin. Lisäksi on kerrottava, mihin kädenjälkilaskennassa saatuja arvoja on verrattu, eli mikä on ollut perusskenaario, johon laskettuja päästövähennyksiä verrataan. Hiilikädenjäljestä on tuotava ilmi, millaisilla mekanismeilla, tekniikoilla tms. päästöjen vähentäminen voidaan saavuttaa sekä mihin vuoteen tietoja ja laskelmia sovelletaan. (Grönman et al., 2018, s.23)



Edellä mainittujen seikkojen lisäksi voidaan huomioida alueellisia vaikutuksia, kuten mille maantieteelliselle alueelle päästövähennykset vaikuttaisivat mahdollisesti. Tuotteen elinkaaren avulla voidaan tutkia, missä vaiheessa sitä päästövähennykset vaikuttavat eniten. Lisäksi on erittäin tärkeää miettiä, ketkä ovat tuotteen asiakkaita ja kohderyhmää, eli kelle hiilijalanjälkeen ja -kädenjälkeen liittyvää viestintää tulisi suunnata. (Grönman et al., 2018, s.23)

Hiilikädenjälki vaatii vielä lisämäärittelyjä, eikä sen laskeminen tai käyttö ole vielä yhtä vakiintunutta kuin esimerkiksi hiilijalanjäljen. Lisämäärittelyjen lisäksi ohjeiden jatkokehitystä ja opastusta tarvitaan, jotta hiilikädenjälkeä voidaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti esimerkiksi yrityksen näkökulmasta. Määrittely vaatii tieteeeseen perustuvaa lähestymistapaa, yhteisiä laskentaperiaatteita, ohjeita ja menetelmiä. Terminologia, soveltamisalat ja lähtökohdat on huomioitava, minkä lisäksi lähestymistapojen on oltava riittävän yksinkertaiset, jotta yritysten on helppo ottaa hiilikädenjälkilaskenta käyttöön. (Behm et al., 2016, s.12)

Määrittelyssä oman haasteensa aiheuttaa aika ja siihen liittyvä teknologian elinkaari, johon palataan hieman myöhemmin. Kysymyksenä onkin, kuinka kauan esimerkiksi uutta teknologiaa voidaan pitää uutena niin, että se kasvattaa hiilikädenjälkeä ja missä vaiheessa uusi teknologia onkin jo yleisesti käytössä olevaa tai jopa vanhentunutta. Gregory Norris käsitteli aihetta artikkelissaan juuri siitä näkökulmasta, kuinka kauan muutoksen vaikutus jatkuu ja mikä on se lähtöviiva, johon kädenjäljen kasvua verrataan. Kun prosessia tai tuotetta parannetaan innovaatioiden avulla, saadaan uusi teknologia markkinoille ja hiilikädenjäljen kasvattaminen on mahdollista. On kuitenkin pohdittava, kuinka kauan innovaation katsotaan edistävän kädenjälkeä. Jossain vaiheessa uusi tuote vanhenee ja poistuu markkinoilta, jolloin se korvataan uudemalla innovaatiolla. Artikkelissa esitetään termi IRTH ”Innovation-Relevant Time Horizon”, jonka pituus riippuisi siitä, millainen prosessi- tai tuotetyyppi on kyseessä ja millainen innovaationsyklin pituus niillä on. (Norris, 2015, s.11)

Koska ilmaston lämpeneminen tulee saada hallintaan mahdollisimman pian ja ehdottomana takarajana voidaan pitää vuotta 2050, voidaan tässä työssä rajata tutkimusten hiilikädenjäljen aikarajaksi vuosi 2050. Tämän jälkeen tilanteen pitäisi olla hallinnassa ja keinot ilmastonmuutoksen hillintään löytyneet. Erilaisia uusia teknologioita pitäisi olla käytössä siten, että hiilineutraalius olisi maailmanlaajuisesti

mahdollinen. Suomen hiilineutraaliustavoite on asetettu vuoteen 2035 ja tällöin halutaan tarjota erilaisia innovaatioita ja teknologioita, joilla hiilineutraalius voitaisiin saavuttaa. Päästövähennyksiin tähtäävät teknologiat tulisi olla siis yleisesti käytössä vuoteen 2050 mennessä, ja yleistyessään voidaan ajatella, että teknologia ei ole enää uusi tai kasvata itsessään hiilikädenjälkeä. Työssä perehdytään myöhemmin eri tutkimusprojekteihin, joista osa liittyy esimerkiksi hiilineutraalin teräksen tuotantoon. Voidaan siis ajatella, että vuoteen 2050 mennessä nämä teknologiat voisivat olla jo vakiintuneita ja ikään kuin ”vanhaa” teknologiaa, eikä enää uusia innovaatioita.

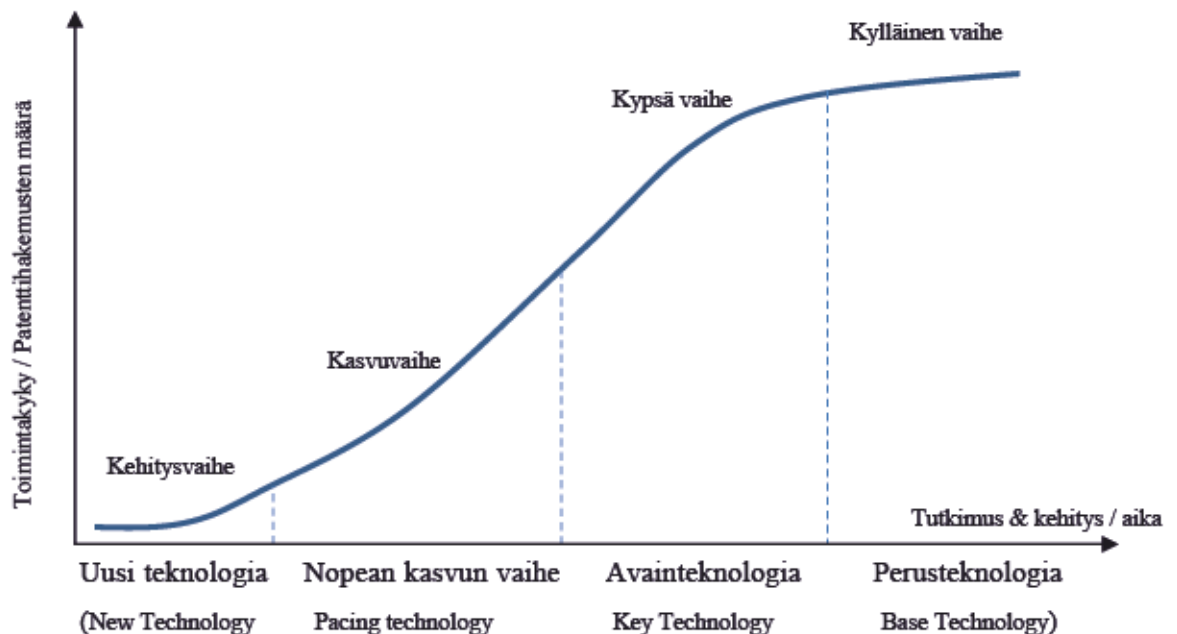
Lisähaasteen aiheuttaa se, ettei hiilen sidonnan osuutta ole määritelty hiilikädenjälkilaskennassa. Hiilen kertyminen maaperään ja kasvillisuuteen vaatii vielä jatkotutkimusta ja potentiaalin arviointia. (Birgisdottir et al., 2021, s. 85-86) Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmässä käsitellään hiilensidontaa hiilivarastoihin ja niiden roolia kädenjälkilaskennassa. Arviointimenetelmän mukaan hiilivarastot ja hiilinielut voidaan laskea mukaan hiilikädenjälkeen, sillä ne ovat absoluuttisia ilmastohyötyjä. (Kuittinen, 2019, s. 30-32) Alvarenga et al. on jaotellut kädenjäljen suoriin ja epäsuoriin kädenjälkiin. Suoralla kädenjäljellä on absoluuttisia positiivisia vaikutuksia, joita tuotteella voi olla sille tarkoitettulla käyttäjällä. Epäsuora kädenjälki voi puolestaan aiheuttaa absoluuttisia positiivisia vaikutuksia joillekin satunnaisille kohteille. (Alvarenga et al., 2020)

Lisäksi hiilikädenjäljessä voidaan nähdä samankaltaisuuksia kuin ekologisissa kompensatioissa (Birgisdottir et al., 2021, s.17). Termillä tarkoitetaan menettelyä, jossa esimerkiksi rakentamisesta aiheutuneet haitat korvataan kompensatioiden avulla lisäämällä luonnonarvoja jossakin muualla. Ekologista kompensatiota voidaan toteuttaa ennallistamalla, kunnostamalla tai suojelemalla elinympäristöä, eli esimerkiksi ojitettujen soiden ennallistamisella tai metsien lahoppuun lisäämisellä. (Suomen Ympäristökeskus, 2019) Näin ollen hiilinieluihin ja -varastoihin liittyvä toiminta voitaisiin myös katsoa hiilikädenjälkeä kasvattavana toimintana. Kyseisessä tilanteessa sidotun hiilen määrä voitaisiin lisätä hiilikädenjälkeen

## 4. TEKNOLOGIAN ELINKAARI JA VALMIUSTASO

### 4.1. Teknologian elinkaari

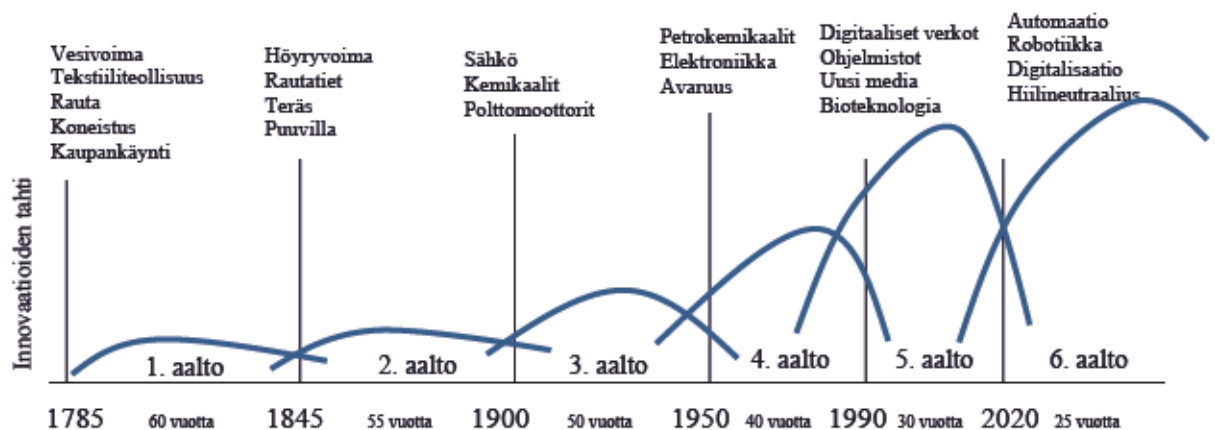
Teknologian elinkaaren voidaan ajatella sisältävän neljä vaihetta: kehitysvaihe (emerging), kasvuvaihe (growth), kypsä vaihe (maturity) ja kylläinen vaihe (saturation). Teknologian elinkaarta voidaan kuvata S-kuvaajalla, jossa esiintyy edellä mainitut vaiheet. Kuvaaja on esitelty kuvassa 4 ja sillä havainnollistetaan teknologian muutosta. Ensimmäisessä vaiheessa, eli kehitysvaiheessa, ei ole olemassa vielä tarkkaan määriteltyä teknologiaa. Uuden teknologian kilpailuvaikutus on vielä melko vähäinen, eikä sitä käytetä vielä yleisesti prosesseissa tai tuotteissa. Kasvuvaiheessa teknologialla on jo kilpailuvaikutusta markkinoilla, mutta sitä ei vielä ole yhdistetty uusiin tuotteisiin tai prosesseihin. Sen asema markkinoilla kasvaa nopeasti ja toimintakyky paranee. Kolmannessa, eli kypsässä vaiheessa, osa teknologioista saa avainaseman. Niillä on korkea kilpailuvaikutus ja ne ovat osa käytössä olevia tuotteita tai prosesseja. Kylläisessä vaiheessa teknologia on saavuttanut huippunsa, sillä on korkea kilpailuasema, se on yleisesti käytössä, minkä jälkeen se korvataan jollain uudella teknologialla. (Gao et al., 2013)



Kuva 4. Teknologian elinkaari S-kuvaajana (mukaillen Gao et al., 2013)

## 4.2. Teknologisten innovaatioiden aallot

Teknologian elinkaaret ovat lyhentyneet vuosikymmenten ja -satojen kuluessa. Innovaatiot sekä taloudellinen kasvu liittyvät voimakkaasti toisiinsa ja niitä voidaan kuvata ikään kuin aaltoina, kuten kuvassa 5. Siinä nähdään aaltojen kesto sekä millaiset innovaatiot ovat silloin kehittyneet. Lisäksi kaaret kuvaavat innovaatioiden kehittymisen tahtia ja kuten kuvasta nähdään, ei ensimmäisten aaltojen innovaatiot kehittyneet niin nopeasti kuin tällä hetkellä käynnissä olevissa. Ensimmäisen aallon voidaan katsoa alkaneen 1700-luvun loppupuolella ja kestäneen noin 60 vuotta. Tässä aallossa voidaan ajatella olevan esimerkiksi vesivoiman, tekstiiliteollisuuden, raudan, koneistuksen ja kaupankäynnin kehitykset. Se ajoittuu vuosien 1785 ja 1845 väliin ja teollisen vallankumouksen alku keskittyikin melko yksinkertaisiin hyödykkeisiin, joista voisi olla hyötyä mahdollisimman monille. (Hargroves & Smith, 2005)



Kuva 5. Innovaatioiden aallot ja niiden kestot. (mukaillen Hargroves & Smith, 2005)

Seuraava aalto kesti puolestaan 55 vuotta sen alkaessa ensimmäisen aallon lopussa ja päättyen vuoden 1900 kohdalla. Tähän aaltoon kuului höyryvoiman, rautateiden kehittyminen sekä teräksen sekä puuvillan yleistymisen. Kolmas aalto oli jälleen hieman lyhyempi, 50 vuotta, ja se sijoittui vuosien 1900 ja 1950 väliin. Sähköistyminen oli merkittävä muutos, sillä se mahdollisti koneiden ja laitteiden käytön ja tämän myötä niiden kehittymisen. Esimerkiksi raitioliikenne ja metrot kehittyivät, minkä lisäksi myös polttomoottorit yleistyivät ja autoteollisuus lähti nousuun. 1900 -luvun puolenvälin jälkeen ennen vuosisadan loppua kehittyivät petrokemian tuotteet, kuten muovit, elektroniikkateollisuus sekä ilmaliikenne. (Hargroves & Smith, 2005)



Viimeisin kokonainen aalto, eli viides aalto, käsittää vuodet 1990 ja 2020 väliltä ja tämän aallon nähdään kestävän noin 30 vuotta, joka on vain puolet ensimmäisen aallon kestosta. Lyhentymisen voidaan katsoa heijastavan kasvavia innovointimahdollisuuksia. Innovaatiot eivät ole yksittäisiä ponnisteluja, vaan ne liittyvät toisiinsa ja ovat organisoituja sekä yhteisiä toimia, jolloin myös tuloksia saadaan nopeasti. Viidennessä aallossa innovaatioiden kehitys on suuntautunut digitaaliseen verkkoon, ohjelmistoihin, uusiin medioihin sekä bioteknologiaan. Erilaiset viestimenetelmät, tehokkaampi tuotanto- ja logistiikkajärjestelmät kehittyivät, jolloin myös uusia teollisuusaloja on kehittynyt esimerkiksi tietokonelaitteisiin ja ohjelmointiin liittyen. (Hargroves & Smith, 2005)

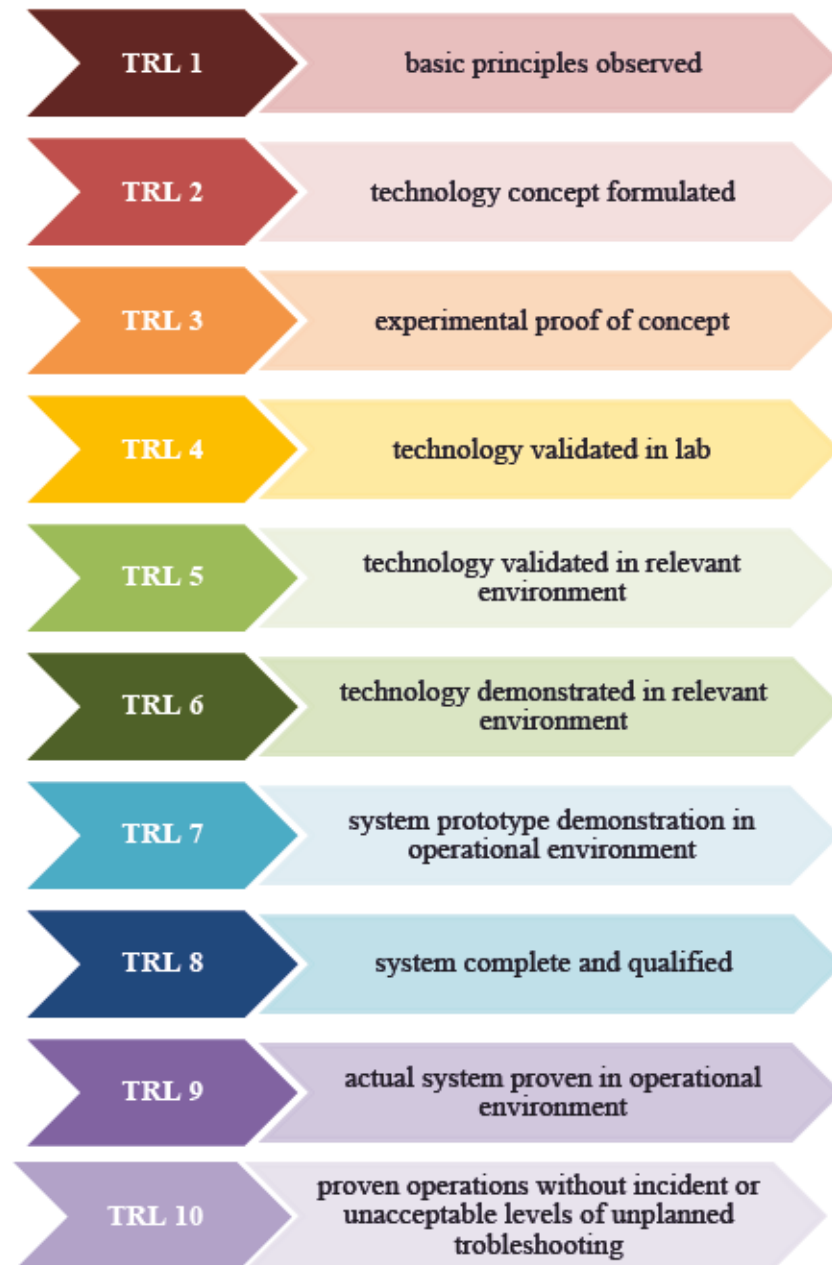
Seuraava, kuudes, aalto on kuvan mukaan jo käynnistynyt ja tulisi kestävänsä noin 25 vuotta. Tämän aallon teknologiat ovat jo kehitteillä ja ne tulevat liittymään automaation, robotiikan sekä digitalisaation innovaatioihin. Kuudetta aaltoa on nimetty myös neljänneksi teolliseksi vallankumoukseksi. (Hargroves & Smith, 2005) Kuudenteen aaltoon on lisätty yhdeksi teknologiaan liittyväksi aiheeksi hiilineutraalius, joka on tulevien vuosien aikana erittäin merkittävä teknologian kehitystä ohjaava tavoite.

Kuten ilmastonmuutosta käsittelevässä luvussa mainittiin, ilmastonmuutoksen hillinnälle on asetettu takarajaksi vuosi 2050 Pariisin ilmastopöytäkirjan mukaisesti, jolloin esimerkiksi Euroopan Unioni aikoo olla ilmastoneutraali. Jotta tämä voidaan saavuttaa, on siirtymisen tapahduttava nopeasti ja uudet teknologiset ratkaisut pitää saada käyttöön nopeasti. (Euroopan komissio, 2021) Tämä aika ajoittuu arvioiden mukaan juuri kuudennen aallon loppuun. Jos tätä tavoitetta tarkastellaan innovaatioaaltojen ja teknologisen elinkaaren mukaisesti, tulisi tällä hetkellä olla olemassa jo mahdollisia innovaatioita, jotta ne ehtivät saavuttaa korkeimman huippunsa vuoteen 2050 mennessä ja näin ollen tuoda ratkaisuja ilmastonmuutoksen hillintään ja sopeutumiseen.

### **4.3. Teknologinen valmiustaso**

Teknologisella valmiustasolla (technology readiness levels, TRL) tarkoitetaan sitä, kuinka valmis palvelu tai tuote on. Tasoja on yhteensä yhdeksän ja ne on esitelty kuvassa 6. Mitä pidemmälle tasoissa edetään, sitä lähempänä tuote tai palvelu on kaupallista käyttöä. Aluksi ollaan aivan tutkimuksen perustasolla, jolloin tuote on täysin kehitysasteella ja sen teknologiaa vasta kehitellään. Kun edetään pidemmälle esimerkiksi

tasolle 7, voidaan jo tehdä prototyypikokeita oikeissa tuotantoympäristöissä. Tasolla 9 oikea tekniikka ja systeemi on tuotu jo oikeisiin tuotanto-olosuhteisiin ja todistettu täysin toimivaksi. (European Commission, 2015)



Kuva 6. Kuvaus TRL- tasoista (European Commission, 2015; Straub, 2015)

Ensimmäiset kolme tasoa voidaan luokitella tutkimuksen perustasolle. Ensimmäisellä tasolla määritellään teknologian peruspiirteitä ja tehdään perustason tutkimusta, jonka jälkeen toisella tasolla teknologian konsepti saadaan muodostettua. Kolmannella tasolla tehdään jo ensimmäisiä kokeita, joilla saadaan varmistettua konseptin toimivuutta. Neljännellä ja viidennellä tasolla tehdään soveltavaa tutkimusta, jolloin esimerkiksi

neljännellä tasolla tutkitaan teknologiaa laboratoriotasolla ja viidenmällä tasolla voidaan siirtyä tutkimuksiin käyttöympäristössä. Seuraavat kolme tasoa sisältyvät kehitysasteeseen. Kuudennella tasolla teknologia demonstroidaan sen kaltaisessa ympäristössä, jossa teknologiaa tulisi käyttää, kun taas seitsemännellä tasolla luodaan jo prototyyppi toiminallisessa ympäristössä. Kahdeksannella tasolla teknologia on jo valmis ja täyttää haluttuja laatutasoja. Sen on todistettu toimivan halutulla tavalla juuri siinä ympäristössä, johon se on tarkoitettu. Viimeinen ja yhdeksäs taso on jo toteutukseen valmis. Systeemi toimii halutussa ympäristössä ja on jo mahdollisesti otettu myös käyttöön. (Machek et al., 2017, s.4)

TRL-tasolta toiselle siirtymiseen kuluva aika riippuu teknologiasta, jonka valmiustasoa tutkitaan. Aikaa tasojen välissä voi kulua vuosia tai lyhyempiä hetkiä ja joissakin tapauksissa tasoja pitkin voidaan edetä nopeammin. Jos TRL-tasojen tarkastellaan innovaatioaallon aikataulun mukaan, voidaan ajatella, että uusi ja täysin kehittymätön teknologia, joka lähtee tasolta 0 olisi edennyt tasolle 9 viimeistään 30 vuoden sisällä. Hargrovesin ja Smithin mukaan nykyhetkellä käynnissä oleva innovaatioaalto tulisi kestämään noin 25 vuotta ja edellinen aalto kesti noin 30 vuotta. (Hargroves & Smith, 2005) Tässä työssä tullaan huomioimaan TRL-tasojen vaikutus tutkimusprojektien päästövähennyspotentiaalissa ja yksinkertaistettuna ajatellaan, että yhden TRL-tason saavutus kestää noin kolme vuotta. Joidenkin tutkimusprojektien kohdalla tavoitellaan kuitenkin esimerkiksi 2-3 TRL-tason nousua tutkimuksen aikana, eli siirtyminen tasolta toiselle voi tapahtua nopeamminkin.

On myös pohdittu sitä, pitäisikö TRL-asteikolle lisätä vielä seuraava taso, TRL 10. Uusi taso olisi helppo lisätä, sillä useat tahot toimivat jo TRL-asteikon kanssa, jolloin taso 10 olisi ymmärrettävissä. Tässä tapauksessa ei tarvittaisi myöskään uutta menetelmää tai arviointijärjestelmää, jos tasojen pystyttäisiin lisäämään ja näin ollen arviointijärjestelmän käyttöä monipuolistamaan. Määritelmäksi TRL 10 -tasolle on esitetty sitä, että toiminnot on todistettu toimiviksi. Teknologiaa on tällöin käytetty ilman häiriöitä jo pidemmän aikaa ja se on tarvittaessa sertifioitu asianmukaisten sertifiointimenetelmien avulla. Teknologian epäonnistumisprosentti on tiedossa, minkä lisäksi erilaiset viat ja niiden syyt ovat tiedossa. Toiminta on sujuvaa, eikä se vaadi odottamattomia vianmäärittelyksiä tai korjauksia. Ero TRL 9 ja 10 -tasojen välillä onkin siinä, että TRL 10 edellyttää useampia onnistuneita toteutuksia, kun tason 9 kohdalla niitä vaaditaan yksi. (Straub, 2015)

Tässä työssä läpikäytäviä tutkimusprojekteja voidaan myös tarkastella TRL 10 -tason mukaan. Voidaan ajatella, että kun tutkimustulokset on olleet jo jonkin aikaa todellisessa, kaupallisessa käytössä, teknologia nousee tasolta 9 tasolle 10. Mikäli teknologia otetaan laajemmin käyttöön, esimerkiksi useamman tahon toimesta, voidaan TRL 10 -tason määritelmän mukaan ajatella, että teknologia on saavuttanut sen verran varman aseman, että se ei ole enää tasolla 9. TRL-tasot on huomioitava myös myöhemmin hiilikädenjäljen määritelmää tarkastellessa sekä pohdittaessa sitä, milloin tutkimuksella on vielä hiilikädenjälkeä kasvattava rooli ja milloin teknologia on sen verran kehittynyt ja yleisesti käytössä, ettei se ole enää varsinaisesti osa hiilikädenjälkeä.

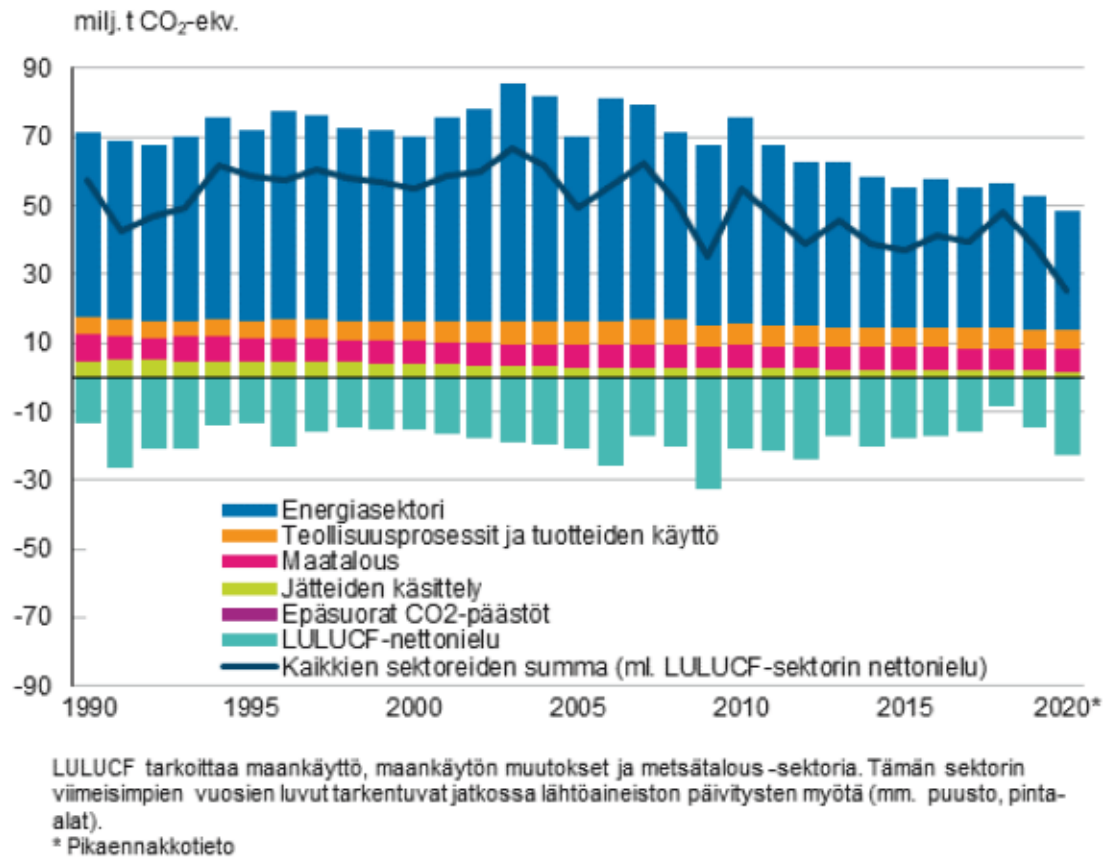


## 5. KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT JA NIIDEN VÄHENNYSKEINOT

### 5.1. Kasvihuonekaasupäästöt Suomessa

Hiilidioksidipäästöjä on pyritty vähentämään Suomessa jo useita vuosia. Vuonna 2020 päästöjen kokonaismäärä oli noin 48,3 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub>-ekv. Edeltävästä vuodesta päästöjä onnistuttiin vähentämään 9 % ja kun kokonaispäästöjä verrataan vuoteen 1990 päästöt ovat yhteensä laskeneet 32 %. Pikaennakkotietojen mukaan vuoden 2020 kokonaispäästöistä 72 % syntyi energiasektorilla, eli polttoaineiden käytöstä ja haihtumapäästöistä. Teollisuusprosessien ja tuotteiden käyttö olivat puolestaan 11 % kokonaispäästöistä, maatalous 14 % ja jätteiden käsittely 4 %. Kokonaispäästöissä ei ole mukana maankäyttöön, sen muutoksiin ja metsätalouteen liittyviä päästöjä, eli LULUCF-sektorin päästöjä ja poistumia, sillä Suomessa ne toimivat nettonieluna ja näin ollen niiden tarkastelu tässä yhteydessä vähentää Suomen kokonaispäästöjä. (Suomen virallinen tilasto, 2021)

Kuvassa 7 on esitelty Suomen kasvihuonekaasupäästöt ja -poistumat eri sektoreiden välillä vuosien 1990 ja 2020 välillä. Mukana on myös LULUCF -sektorin nettonielu, jota kuvataan turkoosilla välillä. Suurimmat päästöt ovat kuvassa tumman sinisellä ja ne kuvastavat energiasektoria. Tumma viiva pylväiden päällä kuvaa kaikkien sektoreiden summaa ja siinä on huomioitu myös LULUCF -sektori, eli maankäyttö, maankäytön muutokset sekä metsätalous. Kuten kuvaajasta nähdään, on LULUCF -sektorilla suuri merkitys kokonaispäästöissä. (Suomen virallinen tilasto, 2021)



Kuva 7. Suomen kasvihuonekaasupäästöt ja -poistumat sektoreittain vuosien 1990 ja 2020 välillä. (Suomen virallinen tilasto (SVT), 2021)

Kuten kuvasta 7 näkyy, energiasektorilla syntyy merkittävä määrä kaikista Suomen päästöistä. Tämän lisäksi myös muut toimialat ovat melko riippuvaisia siitä, miten vähähiilistyminen onnistuu energiateollisuuden kohdalla. Yhteiskunta ja erityisesti teollisuuden eri alat tulevat sähköistymään tulevina vuosikymmeninä merkittävästi. Tämä voi tarkoittaa jopa 100 %:n kasvua teollisuuden sähkönkulutuksessa ja yli 50 %:n kasvua Suomen sähkönkulutuksessa vuoteen 2050 mennessä. Energiateollisuudessa vallitseekin laajempi energiamurros ja vähähiilisyyden tavoittelu on vain osa tätä. (Paloneva & Takamäki, 2020, s. 30)

Energia-alalla pyritään päästöttömään sähköön, jolloin fossiilisista polttoaineista luovutaan niin liikenteessä, palveluissa, työkaluissa, teollisuudessa, lämmityksessä ja maataloudessa. Tärkeää on varmistaa puhtaan energian toimitusvarmuus sekä toimivat energiaverkot ja näin energia-ala on vahvasti sidoksissa myös muiden alojen hiilineutraaliuteen. (Energiateollisuus, 2021) Sähköntuotannon kehittäminen vaatii jatkossa investointeja, jotta esimerkiksi siirtoverkko toimisi laajemmalla markkina-

alueella joustavasti kysynnän ja tarjonnan mukaan. Myös kaukolämmön ja yhteistuotannon roolilla on suuri merkitys hiilineutraaliutta tavoitellessa. Kaukolämpöjärjestelmillä saadaan tarvittavaa joustoa energijärjestelmään, mutta myös sinne tarvitaan uusia vähähiilisiä tuotantotapoja ja varastoja, joilla päästövähennyksiin on mahdollista päästä. (Paloneva & Takamäki, 2020, s. 44-45)

Eri teollisuuden alat pyrkivät hiilineutraaliuteen omilla keinoillaan. Kemianteollisuudessa hiilineutraalius halutaan saavuttaa vuoteen 2045 mennessä niin hiilijalanjäljen pienentämisellä kuin hiilikädenjälkeä kasvattamalla. Jotta päästöjä voidaan pienentää, tarvitaan myös kemianteollisuudessa päästötöntä energiaa. Lisäksi tarvitaan uusia innovaatioita, joiden saaminen käyttöön vaatii investointeja. Hiilikädenjälkeä kemianteollisuus pyrkii kasvattamaan tarjoamalla asiakkaille päästöjä pienentäviä tuotteita ja ratkaisuja. Päästöttömän energian ja investointien lisäksi tarvitaan uusia raaka-aineita, jotta fossiilisten raaka-aineiden käyttöä pystytään vähentämään ja tähän yhtenä apuna on kiertotalouden kehittyminen ja sen hyödyntäminen. Lisäksi tarvitaan uusia teknologioita sekä osaajia, jotta alaa saadaan vietyä kohti hiilineutraaliutta. (Kemianteollisuus, 2021)

Metsäteollisuudella on Suomessa myös myönteisiä vaikutuksia. Uskotaan, että alalla tehtaiden on mahdollista päästä fossiilisista polttoaineista eroon kokonaan pian vuoden 2035 jälkeen. Vuonna 2017 arvioitiin, että metsäteollisuudella oli noin 16 miljoonan tonnin vuosittainen myönteinen ilmastovaikutus. Tämä syntyy siitä, että puusta valmistetut tuotteet voivat korvata tuotteita, joiden valmistamisesta syntyy enemmän päästöjä, kuten muovipakkauksia. Kun hiilineutraaliustiekartta on laadittu, on laskettu, että Suomen metsävaroihin olisi varastoitunut noin 3200 miljoonaa tonnia hiilidioksidia ja näin ollen metsät toimivat merkittävänä hiilinieluna. Hiilinielujen toimiminen ja säilyminen vaatii kuitenkin aktiivista ja kestävää metsätaloutta. (Paloneva & Takamäki, 2020, s.59-60)

Teknolomiteollisuuteen puolestaan kuuluu useita sektoreita ja päästöjä syntyy useista eri lähteistä. Eri sektoreilla syntyy niin suoria päästöjä, eli scope 1 päästöjä sekä myös scope 2 päästöjä esimerkiksi ostetun energian mukana. Vuonna 2018 suorat päästöt olivat noin 4 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub>-ekv. ja suurin osa niistä tuli metallien jalostuksesta sekä metallimalmien ja teollisuusmineraalien louhinnasta. Sektorit voivat pienentää päästöjään huomattavasti ja useimmin se perustuukin prosessien ja koneiden

sähköistämiseen, tehokkuuden parantamiseen energian ja materiaalien osalta, kiertotalouden kehittämiseen sekä erilaisiin digitaalisiin ratkaisuihin. Suurin päästövähennys nähdäänkin tapahtuvan terästeollisuuden osalta, kun SSAB:n kehittämä vetypelkistykseen perustuva teräksen valmistusprosessi saadaan käyttöön 2030-luvulla. (Paloneva & Takamäki, 2020, s.64–65)

Liikenteestä syntyy noin viidennes Suomen kaikista päästöistä ja tavoitteeksi onkin asetettu päästöjen puolittaminen vuoteen 2030 mennessä, kun vertailuajankohtana on vuosi 2005 ja nollapäästöjen tavoite on vuoteen 2045 mennessä. Tähän on kuitenkin matkaa, sillä vuosien 2005 ja 2018 välillä päästöt olivat vähentyneet noin 10 %. Ratkaisuja päästöjen vähentämiseen haetaan autokannan uusiutumisen nopeuttamisesta, joukkoliikenteen ja kaupunkien kestävästä kulkumuodoista, uusiutuvista polttoaineista, kestävästä liikenteen palveluista ja digitalisaatiosta sekä infrastruktuurin kehittämisestä liikennejärjestelmässä. (Paloneva & Takamäki, 2020, s.77 & 80-81)

Rakennusteollisuudella on myös merkittävä asema hiilidioksidipäästöjen tuottajana ja rakennettu ympäristö vastaakin noin kolmanneksesta Suomen kulutuksen kasvihuonekaasupäästöistä. Suurin osa päästöistä syntyy rakennusten käytönaikaisesta energiankulutuksesta. Tämän takia onkin tärkeää leikata nykyisen rakennuskannan energiankulutusta esimerkiksi energiatehokkuutta parantamalla sekä kehittää energiamuotoja vähähiilisemmäksi. (Paloneva & Takamäki, 2020, s. 92-93) Päästöjä pyritään vähentämään 66 % vuoteen 2035 mennessä niin rakennetussa ympäristössä kuin rakentamisessakin. Jos teknologiaharppaukset toteutuvat, voidaan päästä jopa 80 % vähennyksiin ja 95 % vähennys voidaan saavuttaa vuoden 2050 kohdalla. Sähköistamisellä ja biopolttoaineilla on tärkeä rooli myös rakennusteollisuudessa, minkä lisäksi rakennusmateriaalien, kuten sementin ja teräksen valmistuksen kehittämisellä tulee olemaan suuri vaikutus. (Rakennusteollisuus RT ry, 2021)

Näiden alojen lisäksi vähähiilisyystiekarttoja on valmistettu myös elintarviketeollisuuden, tekstiilialan, sahateollisuuden, maatalouden, kiinteistöjen, matkailu- ja ravintola-alan sekä kaupan alan kohdalla. Elintarviketeollisuudessa vähähiilisyttä tavoitellaan esimerkiksi lämpöpumppujen avulla ja integroimalla biokaasulaitoksia osaksi biojätteiden käsittelyä. Tekstiilialalla panostetaan kierrätys- ja kuituteknologiaan sekä RFID-tunnistusteknologiaan. Sahateollisuudessa halutaan panostaa sahaus- ja kuivausteknologioihin kun taas maataloudessa keinot liittyvät viljely-



ja lannankäsittelyteknologioihin, biokaasulaitoksiin sekä työkonoiden vaihtoehtoihin käyttövoimiin. Kiinteistöjen kohdalla älykkäät automaatiot sekä ohjausjärjestelmät, IoT-ratkaisut ja virtuaaliset tuotantolaitokset (Virtual Power Plant), tuovat ratkaisuja vähähiilisuuden saavuttamiseen. Matkailu- ja ravintola-alalla ilmalämpöpumppujen ja energiatehokkuuden parantamisen avulla voidaan vähentää päästöjä ja kaupan alalla energian käyttöä automatisoidaan sekä talteen otetaan, minkä lisäksi kylmälaitosteknologian vähähiilisyyteen tulee panostaa. (Paloneva & Takamäki, 2020, s.36-37)

## **5.2.Kasvihuonekaasupäästöjen vähennyskeinot**

Päästöjä voidaan vähentää erilaisilla keinoilla ja menetelmillä. Toimialojen vähähiilitiekartoissa toistuvat esimerkiksi vähäpäästöiseen energiantuotantoon, materiaali- ja energiatehokkuuteen sekä hiilidioksidin talteenottoon, hyödyntämiseen ja varastointiin liittyvät teknologiset ratkaisut. (Paloneva & Takamäki, 2020, s.11) Teknologiateollisuuden tiekartassa kohti hiilineutraaliutta on esitetty keinoja, joilla tavoitteeseen voitaisiin päästä. Teknisiä ratkaisuja on ja esimerkiksi energian käyttö on yksi merkittävimmistä päästölähteistä. Oman haasteensa kuitenkin aiheuttaa se, että helpot keinot energiansäästämiseen ja prosessien parantamiseen on jo käytetty, eli uusia innovaatioita tarvitaan. Tämän lisäksi alalla on monenlaista toimintaa, joten yksiselitteisiä ja kaikkeen sopivia ratkaisuja ei ole. ICT-sektorilla energiankulutus on jopa kasvussa. (Vasara et al., 2020)

Tässä työssä tutkimusprojekteja lähdetään jaottelemaan sen mukaan, millaisia päästövähennyskeinoja niissä hyödynnetään. Eri päästövähennyskeinot, joiden avulla projekteja tarkastellaan, ovat:

- suora päästövähennys
- prosessin tehostaminen eli relatiivinen muutos
- energiansäästö
- substituuio
- hiilidioksidin talteenotto ja varastointi
- hiilen sidonta maaperään / luonnon hiilivarastot

Suoria päästövähennyksiä saadaan aikaiseksi esimerkiksi, kun tuote tai palvelu voidaan tuottaa uudella tavalla ja vähemmällä päästöillä. Yksi teknologiateollisuuden ala, jolla tällaisia mahdollisuuksia on, on metallinjalostuksessa, jossa on kehitteillä uusia prosessikonsepteja, kuten vetypelkistys. SSAB:n kehittelemä HYBRIT onkin esimerkki tällaisesta uudesta teknologiasta, jolla voi olla suuri merkitys suorissa päästövähennyksissä. (Vasara et al., 2020)

Toinen keino saavuttaa päästövähennyksiä on prosessin tehostaminen, eli käytössä oleva teknologia tai käytetyt raaka-aineet eivät itsessään muutu, vaan prosessia tehostetaan jollakin tavalla, jolloin päästöjä saadaan vähennettyä. Tässä tapauksessa on kyse relatiivisesta muutoksesta, kun suorissa päästövähennyksissä muutoksen tulos on absoluuttinen. Esimerkiksi kemianteollisuudessa prosesseja voitaisiin tehostaa katalyyttiratkaisuilla, jolloin päästöjen määrä voisi vähentyä. (Paloneva & Takamäki, 2020, s. 56 & 103) Teknologiateollisuuden hiilineutraaliustiekartassa puolestaan on tarkasteltu kolmea eri skenaariota ja nopeutetun teknologisen kehityksen skenaariossa onkin mainittu prosessien tehostaminen yhtenä keinona saavuttaa päästövähennyksiä. Prosessia voidaan tehostaa erilaisilla optimoinneilla sekä materiaali- ja energiatehokkuusparannuksilla, hukkalämmön hyödyntämisellä, prosessimuutoksilla sekä prosessioptimoinnilla ja simuloinnilla. (Vasara et al., 2020, s.26)

Päästövähennyksiä voidaan edistää myös energiansäästön ja -optimoinnin avulla. Toimialat ovatkin erittäin riippuvaisia vähähiilisestä energiateollisuudesta päästövähennyksiä tavoitellessaan. Kuten aiemmin mainittiin, sähköistyminen voimistuu runsaasti ja sähkönkulutus tulee kasvamaan huomattavasti. Energiamurroksessa päästöt tulevat laskemaan merkittävästi ja Energiateollisuus ry onkin sitoutunut puolittamaan päästöt vuoteen 2030 mennessä. Erityisesti prosessilämmön ja vedyn tuotannon sähköistyminen kasvattaa suuresti sähkön kysyntää jo vuoteen 2035 mennessä. Sähköntuotannon kehittämiseen tarvitaankin merkittäviä investointeja. (Paloneva & Takamäki, 2020, s.30 & 44-45)

Yksi energiateollisuuden kehityskohteista on kaukolämmöntuotanto. Arvioiden mukaan järjestelmä tulisi jatkossakin nojaamaan puupolttoaineisiin, mutta valtaosa tarvittavasta lämmöstä voitaisiin kattaa erilaisilla ei-polttavilla teknologioilla. Kaukolämpöjärjestelmät takaavat joustoa energijärjestelmään, sillä ne voivat tarjota kysyntäjoustoa, jotta järjestelmä pysyisi tasapainossa. Tämän lisäksi kaukolämpövarastot

voivat osallistua myös energiajärjestelmän joustavuuteen. Hukkalämmöllä sekä geotermisillä ja teollisilla lämpöpumpuilla voidaan jatkossa kattaa arvioiden mukaan noin kolmannes kaukolämmön kysynnästä. Öljyä käytetään nykyäänkin jo melko vähän, lähinnä käynnistys- ja varapolttolainena erityisesti pakkassäällä. Määrät tulevat kuitenkin pienenemään edelleen kaukolämpöverkoston kehittymisen myötä. Myös turpeen käyttö tulee vähenemään, mutta 2030 -luvulla niin öljy, turve ja maakaasu tulevat säilymään toimintavarmuuden takaavina polttoaineina. Päästöt tulevat siis jatkossa pääasiassa jätteenpoltosta sekä toimintavarmuuden takaavista polttoaineista. Vuonna 2050 sähkön ja kaukolämmön tuotannon tulisi olla lähes päästötöntä. (Paloneva & Takamäki, 2020, s. 45–46)

Seuraava keino päästövähennyksien tavoittelussa on substituuio. Sillä tarkoitetaan tilannetta, jossa tuote tai palvelu korvataan jollakin toisella, jonka käyttäminen on ympäristöystävällisempää. Substituutiossa hiili-intensiivisiä raaka-aineita voidaan korvata kierrätys- tai biomateriaaleilla ja vähentää tällä tavalla päästöjä. Tällainen tilanne voi olla esimerkiksi muovipakkausten korvaaminen puupohjaisilla pakkauksilla. Substituutio tapahtuu suhteessa vertailutilanteeseen, mutta mittaaminen ja laskeminen voi olla kuitenkin haastavaa, sillä vähennetyt päästöt eivät ole absoluuttisia. (Lipsanen & Soimakallio, 2021)

Hiilidioksidin talteenottoa tai varastointia voidaan tarkastella myös päästövähennyspotentiaalin näkökulmasta. Sekä varastointiin että talteenottoon voidaan käyttää useita ratkaisuja. CCS-tekniikoilla (Carbon Capture and Storage) tarkoitetaan juurikin fossiilisen hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin liittyviä vaiheita ja tekniikoita. Hiilidioksidin varastointi ei tarjoa yksinään ratkaisua päästöihin, mutta hyvin toteutettuna ja huolellisesti suunniteltuna sekä valvottuna sen avulla voidaan päästä lähelle pysyvää varastointia ja näin ollen se tarjoaa hyvän lisän päästövähennyskeinoihin. Talteenotto on jopa varastointia haasteellisempaa ja talteenottotekniikat voidaan jakaa kolmeen ryhmään: polton jälkeinen talteenotto, talteenotto ennen polttoa sekä happipolttu. Varastointia voidaan puolestaan tällä hetkellä tehdä ainakin neljällä eri tavalla: johtamalla maaperään, merenpohjaan, sitouttaa biomassaan tai sitoa kemiallisten reaktioiden avulla kiinteiksi mineraaleiksi. Mineralisaatiotekniikka on vielä kehitysasteella, mutta siinä hiilidioksidi reagoi silikaattien kanssa ja lopputuotteena saadaan stabiili metallikarbonaattimineraali ja näin ollen varastointia voidaan pitää lopullisena. (Suomen Ympäristökeskus, 2021b)

Viimeinen käsiteltävä päästövähennyskeino on hiilen sidonta. Sitra on määritellyt hiilen sidonnan seuraavalla tavalla: ”Prosessi, jossa hiiltä otetaan ilmakehästä ja varastoidaan paikallisesti, kuten esimerkiksi kasvien yhteyttämisessä.” (Sitra, 2021) Hiilensidontaan sopivatkin puut sekä muut kasvit, jotka kasvaessaan sitovat itseensä hiiltä. Osa hiilestä päätyy maaperään, osa vapautuu ilmakehään puun lahotessa ja osa korjataan puunhakkuissa pois metsästä. Pitkäikäiset puutuotteet voivat kuitenkin vielä varastoida hiiltä itseensä vielä korjauksen jälkeenkin. Kun hiilivarastot kasvavat metsissä, toimivat ne samalla myös hiilinieluinä, jolloin puuston kasvu sitoo enemmän hiiltä kuin hakkuissa ja lahoamisessa vapautuu. Metsien lisäksi hiiltä voidaan sitoa myös esimerkiksi soihin. (Bioenergia ry, 2021) Hiilinieluja voidaan saada aikaan esimerkiksi soita ennallistamalla, metsän kiertoajan pidentämisellä eli kasvatukseen liittyvillä tekijöillä tai hiilinieluja luomalla, eli esimerkiksi kasvittoman alueen metsittämisellä. Nielujen lisäys perustuukin siis metsä- ja maankäyttösektorin eli LULUCF:n hiilivarastoihin ja niiden parantamiseen. (Auvinen et al., 2021, s. 94) Maaperä toimiikin suurena hiilivarastona ja siellä arvioidaan olevan jopa 1500-2400 gigatonnia hiiltä, eli noin kolminkertainen määrä verrattuna ilmakehän hiilimäärään. Pienilläkin muutoksilla ja tehostuksilla hiilidioksidin sitomisessa maaperään voidaan siis saavuttaa merkittäviä muutoksia ilmakehän hiilidioksidipitoisuuksille. (Heinonsalo, 2020)



## 6. OULUN YLIOPISTON TUTKIMUSTYÖ

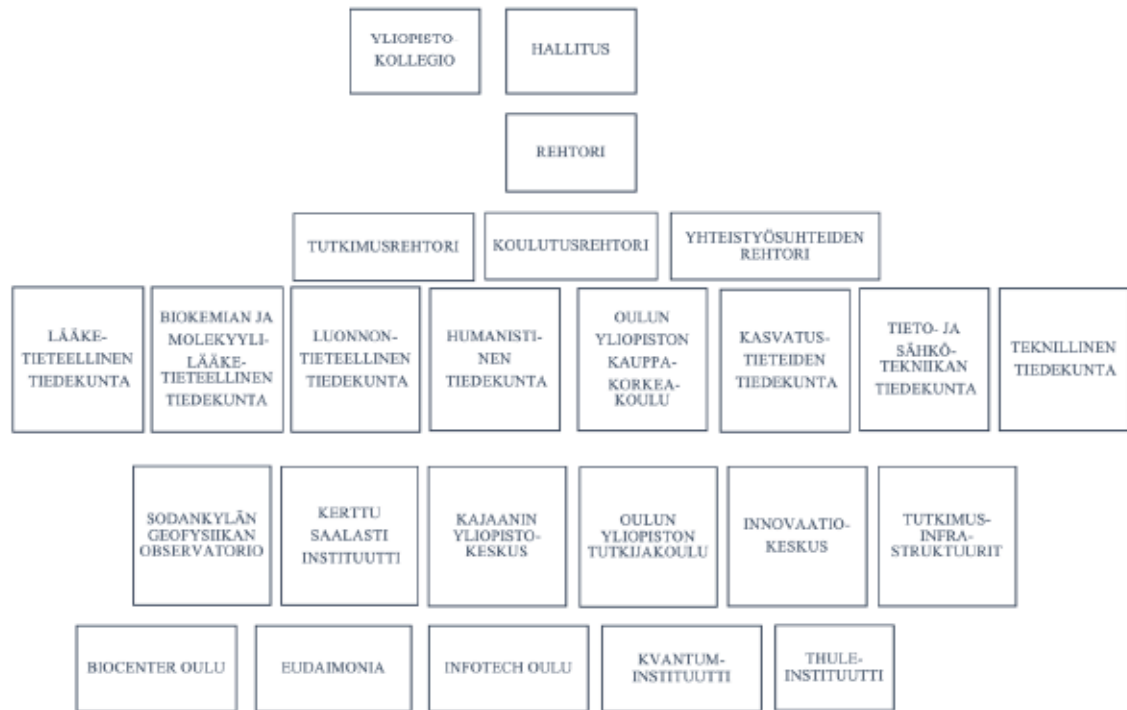
### 6.1. Oulun Yliopisto

Oulun Yliopisto on perustettu vuonna 1958 ja se on Suomen yksi monitieteisimpiä ja suurimpia yliopistoja. Opiskelijoita Oulun Yliopistossa on noin 13 000 ja tiedekuntia yhteensä 8. Työntekijöiden lukumäärä on puolestaan noin 3000.<sup>1</sup> Oulun Yliopiston organisaatiokaavio on esitelty kuvassa 8. Tiedekuntia Oulun Yliopistossa on yhteensä kahdeksan: lääketieteellinen, biokemian ja molekyyli­lääketieteen, luonnontieteellinen, humanistinen, kauppakorkeakoulu, kasvatustieteiden, tieto- ja sähkötekniikan sekä teknillinen tiedekunta. Tiedekunnat jakautuvat vielä useisiin eri tutkimusyksiköihin, minkä lisäksi tutkimusta tehdään myös fokusinstituuteissa, jotka yhdistävät eri tieteenaloja. Fokusinstituutteja ovat Biocenter Oulu, Eudaimonia, Infotech Oulu, Kvantum-instituutti sekä Thule -instituutti. Ne tukevat verkottumista tieteenalojen välillä, erilaisia poikkitieteellisiä hankkeita sekä tohtorikoulutusta ylittäen tiedekuntarajoja. Tämän lisäksi yliopistoon kuuluu kuusi erillisyyksikköä: Sodankylän geofysiikan observatorio, Kerttu Saalastin instituutti, Kajaanin yliopistokeskus, Oulun Yliopiston tutkijakoulu, Innovaatiokeskus sekä Tutkimusinfrastruktuurit.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Oulun Yliopisto, <https://www oulu.fi/fi/yliopisto>

<sup>2</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Tiedekunnat ja yksiköt, <https://www oulu.fi/fi/yliopisto/tiedekunnat-ja-yksikot>



Kuva 8. Oulun Yliopiston organisaatiokaavio<sup>3</sup>

Tässä työssä tutkimusprojekteja kartoitettiin kolmesta tiedekunnasta: teknillisestä tiedekunnasta, tieto- ja sähkötekniikan tiedekunnasta sekä luonnontieteellisestä tiedekunnasta. Rajaus tehtiin sen perusteella, missä tiedekunnassa ajateltiin olevan käynnissä päästövähennyksiin tai ilmastonmuutoksen hillintään tähtääviä tutkimusprojekteja. Näihin tiedekuntiin perehdytään lisää seuraavissa kappaleissa ja esitellään tutkimusryhmät, joiden tutkimusprojektit huomioitiin tässä työssä.

### 6.1.1. Teknillinen tiedekunta

Oulun yliopiston teknillinen tiedekunta tavoittelee roolia yhtenä maailman johtavista tutkimustiedon, kestävien ratkaisujen tuottajien ja kouluttajien joukkona. Tavoitteena on kehittää sitä, miten ihminen voi teknologian avulla hillitä ilmastonmuutosta sekä edistää kestävää kehitystä ja hyvinvointia. Tiedekunta haluaa olla mukana luonnonvarojen kestävä hyödyntämisen huipposaaajana. Teknillinen tiedekunta jakautuu 12

<sup>3</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Organisaatiokaavio, <https://patio.oulu.fi/fi/yliopisto/organisaatio>

kansainväliseen tutkimusyksikköön, minkä lisäksi tiedekunnassa toimii useita monialaisia tutkimusyhteisöjä. 12 tiedekunnassa toimivaa tutkimusyksikköä ovat:<sup>4</sup>

- Arkkitehtuuri
- Kaivannaisalan yksikkö – Oulu Mining School
- Kemiaallinen prosessitekniikka
- Kestävä kemia
- Kuitu- ja partikkelitekniikka
- Materiaali- ja konetekniikka
- Prosessimetallurgia
- Rakenteet ja rakentamisteknologia
- Tuotantotalous
- Vesi-, energia- ja ympäristötekniikka
- Ympäristö- ja kemiantekniikka
- Älykkäät koneet ja järjestelmät

Arkkitehtuurin yksikössä opetuksen ja tutkimuksen erityisalana on muuttuva pohjoinen rakennettu ympäristö. Opetuksen ja tutkimustyön vastuu on jaettu neljän eri aineryhmän kesken, jotka ovat arkkitehtuurin historia ja korjaussuunnittelu, nykyaikainen arkkitehtuuri, rakennussuunnittelu ja yhdyskuntasuunnittelu. Arkkitehtuurin historia ja korjaussuunnittelu keskittyy nimensä mukaisesti arkkitehtuurin historian perustutkimukseen sekä korjaussuunnitteluun erityisesti rakennusperinnön ja kulttuuriympäristöjen parissa. Nykyaikainen arkkitehtuuri liittyy esimerkiksi teknologian ja urbaanin kaupunkitilan sekä arkkitehtuurin suhteen ja vuorovaikutuksen tarkasteluun. Rakennussuunnittelussa tutkimus keskittyy puurakentamiseen, energiatehokkuuteen sekä esimerkiksi peruskorjauskäytännön kysymyksiin. Yhdyskuntasuunnittelussa keskitytään erityisesti erilaisten yhdyskuntasuunnittelun käytäntöjen tutkimiseen ja kehittämiseen. Esimerkkiaiheita tästä ovat esimerkiksi integroiva kaupunkikehittäminen, vuorovaikutteinen suunnittelu sekä teknologiatuettu suunnittelu.<sup>5</sup>

---

<sup>4</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Teknillinen tiedekunta, <https://www.oulu.fi/fi/yliopisto/tiedekunnat-ja-yksikot/teknillinen-tiedekunta>

<sup>5</sup> Oulun Yliopisto, 2018. Arkkitehtuurin tutkimusyksikkö, <https://www.oulu.fi/arkkitehtuuri/node/8573>

Kaivannaisalan yksikkö eli Oulu Mining School on mukana vastaamassa lisääntyneen malminetsinnän ja kaivostoiminnan aktivoitumiseen. Erityisesti Oulun Yliopiston kaivannaisalan yksikkö on mukana pohjoisen luonnonvarojen ja kestäväen kehityksen alueella.<sup>6</sup> Tutkimusyksikkö jakaantuu kahteen pääryhmään: Geologia ja mineralogia sekä kaivostekniikka. Geologian ja mineralogian tutkimushankkeissa keskitytään Suomen arkeisen ja varhaisproterotsooisien kallioperän syntyyn ja kehitykseen sekä niihin liittyviin geologisiin prosesseihin.<sup>7</sup> Kaivostekniikan tutkimuksessa sovelletaan mekaniikkaa ja konetekniikkaa sekä myös muita tieteenaloja. Tutkimustyö liittyy erityisesti rikastustekniikkaan, geologiaan, metallurgiaan sekä geotekniikkaan.<sup>8</sup>

Kemiallisen prosessitekniikan tutkimusyksikössä yhdistyvät kemiallinen prosessitekniikka sekä bioprosessitekniikan menetelmät. Erilaiset biomassojen käsittelytekniikat ja niiden hyödyntäminen kestävästi esimerkiksi biopolttoaineena tai -kemikaaleina ovat yksikön tutkimuksien lähtökohtia. Biomassojen kemiallinen ja biokemiallinen käsittely, uudet tuotteet ja prosessit teollisuuden vesienkäsittelyyn sekä tuotteiden talteenotto- ja erotusprosessien synteetit ovat tutkimusyksikön tarkempia tutkimusalueita. Lignoselluloosan hyödyntäminen biotuotteina on myös merkittävässä osassa tutkimusyksikön toimintaa.<sup>9</sup>

Kestäväen kemian tutkimusyksikössä tehdään laajasti tutkimusta erilaisten kemiallisten materiaalien ja menetelmien, kemikaalien, biomassojen kemiallisen muokkauksen ynnä muun parissa. Tutkimukset voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen. Yksi niistä on biomassan kemiallinen muokkaus erilaisiksi korkean lisäarvon tuotteiksi. Erityisesti tähän liittyvät katalyytit biomassojen modifoinnissa sekä uusien biomassapohjaisten vedenpuhdistusmateriaalien kehittäminen. Toiseen tutkimusalueeseen kuuluvat uudet adsorbenttimateriaalit vedenkäsittelyssä, kemialliset saostukset ja elektrokoagulaatio sekä katalyyttinen märkähapetus. Kolmannes osa-alue keskittyy uusien energian tuotantoon ja varastointiin liittyvien materiaalien kehittämiseen. Tutkimuksen kohteena ovat erityisesti litiumioniakkukemikaalit sekä aurinkokennomateriaalit.<sup>10</sup>

---

<sup>6</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Kaivannaisalan yksikkö – Oulu Mining school, <https://www oulu.fi/katk/>

<sup>7</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Geologia ja mineralogia, <https://www oulu.fi/katk/node/57641>

<sup>8</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Kaivostekniikka, <https://www oulu.fi/katk/node/57647>

<sup>9</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Kemiallisen prosessitekniikan tutkimusyksikkö, <https://www oulu.fi/pyokem/>

<sup>10</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Kestäväen kemian tutkimusyksikkö, <https://www oulu.fi/kestavakemia/>



Kuitu- ja partikkelitekniikan tutkimusyksikkö tavoittelee kiertotalouden edistämistä sekä biotalouden toteutumista erilaisten materiaalitutkimusten avulla. Yksikössä tehdään tutkimusta niin puun ja selluloosan kuin mineraalisten sivuvirtojen parissa. Näin ollen kuitu- ja partikkelitekniikan tutkimusyksikössä on kaksi eri tutkimusryhmää: selluloosaryhmä ja epäorgaaniset sideaineet ryhmä. Selluloosaryhmä keskittyy erilaisiin lignoselluloosapohjaisiin materiaaleihin ja kemikaaleihin. Ryhmä kehittää uusia biokemikaaleja ja tutkivat lisäksi erilaisia syväeutektisia liuottimia ja hapetusmenetelmiä, joilla voidaan muokata lignoselluloosamateriaaleja. Epäorgaanisten sideaineiden ryhmässä tehdään tutkimusta teollisuudessa syntyvien mineraalisten sivuvirtojen parissa ja pyritään löytämään uusia käyttökohteita niille. Keskeisenä tutkimuskohteena ovat sementtimäiset materiaalit, kuten geopolymeerit. Kiertotalouden materiaaleja tutkittaessa halutaan varmistaa niiden turvallisuus niin ympäristön kuin loppukäyttäjänkin kannalta.<sup>11</sup>

Materiaali- ja konetekniikan tutkimusyksikön toiminta keskittyy terästuotteiden kehitykseen, ominaisuuksiin ja sovelluksiin. Yksikkö jakaantuu useisiin eri tutkimusryhmiin, joiden päättutkimuskohteet vaihtelevat erilaisten teräksen, metallurgian, suunnittelun ja teknologioiden välillä.<sup>12</sup> Esimerkiksi konesuunnittelun tutkimusryhmässä tutkimusaiheet liittyvät paperiteollisuuteen, konesuunnitteluun, koneiden mekaniikkaan ja telakkateollisuuteen.<sup>13</sup> Mallintamisen ja käytettävyyden tutkimusryhmässä kehitetään uusia malleja kuumavalssausprosesseihin.<sup>14</sup> Uudenlaisen ruostumattoman teräksen tutkimusryhmä keskittyy seosteaineiden tasapainon optimointiin.<sup>15</sup>

Prosessimetallurgian tutkimusyksikkö keskittyy metallien pyrometallurgisiin valmistusprosesseihin sekä muihin korkealämpötilaprosesseihin, jotka liittyvät erityisesti raudan, teräksen ja ferroseosten valmistukseen. Tutkimusyksikön tutkimuksen tärkein kohde on tällä hetkellä metallien valmistuksen hiilidioksidipäästöjen vähennys sekä kiertotalouden hyödyntäminen metallien valmistuksessa. Oulun yliopistossa toimii Terästudkimuskeskus CASR, jonka yksi keskeisimmistä osa-alueista on

<sup>11</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Kuitu- ja partikkelitekniikan tutkimusyksikkö, <https://www oulu.fi/pyokui/>.

<sup>12</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Materiaali- ja konetekniikan tutkimusyksikkö, <https://www oulu.fi/materialsengineering/node/44832>

<sup>13</sup> Oulun Yliopisto, 2020. Konesuunnittelun tutkimusryhmä, [https://www oulu.fi/materialsengineering/machine\\_design](https://www oulu.fi/materialsengineering/machine_design)

<sup>14</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Mallintamisen ja käytettävyyden tutkimusryhmä, <https://www oulu.fi/materialsengineering/node/44832>

<sup>15</sup> Oulun Yliopisto, 2020. Uudenlaisen ruostumattoman teräksen tutkimusryhmä, <https://www oulu.fi/materialsengineering/node/44830>

prosessimetallurgia. Tutkimuksessa keskitytään koko teräksen valmistusketjuun aina raaka-aineiden käsittelystä valettuun aihioon saakka. Tässä tärkeänä osana on hiilineutraalien metallien kehittäminen.<sup>16</sup>

Rakenteiden ja rakennusteknologian tutkimusyksikössä pyritään kohti älykästä, kestävää ja joustavaa sekä resurssitehokasta rakennettua ympäristöä. Yksikössä keskitytään uusien ja nykyisten teknologioiden mahdollisuuksiin, systeemien ymmärtämiseen sekä ihmiskeskeisiin ratkaisuihin niin rakenteiden kuin rakennetun ympäristön elinkaaren aikana. Tutkimusryhmässä tärkeimpiä teemoja ovat teknologia, ihmiskeskeisyys sekä järjestelmät. Tutkimuksiin siis liittyy esimerkiksi automaatiota ja digitalisaatiota, minkä lisäksi halutaan huomioida terveys ja kestävyys.<sup>17</sup>

Tuotantotalouden tutkimusyksikössä yhdistetään tekninen osaaminen, taloustieteen menetelmät sekä ymmärrys ihmisten käyttäytymisestä. Ilmiöitä tutkitaan ja ratkaisuja etsitään näiden näkökulmien perusteella. Yksikössä halutaankin painottaa projektiliiketoiminnan, tuotannon ja toimitusketjun johtamisen, tuotehallinnan sekä työhyvinvoinnin ja tuottavuuden tutkimusalueita. Tutkimusta tehdään tiivissä yhteistyössä muiden tekniikan alojen kanssa ja tavoitteena on vaikuttaa myönteisesti niin teollisuuteen, liike-elämään kuin koko yhteiskuntaankin. Tärkeimmät tutkimusalueet ovat projektiliiketoiminta, tuotannon ja toimitusketjun johtaminen, tuotehallinta sekä työhyvinvointi ja tuottavuus.<sup>18</sup>

Vesi-, energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikkö jakaantuu neljään tutkimusryhmään: Hydrologia ja vedenlaatu, Vesijärjestelmien suunnittelu ja hallinta, Vesihuolto ja vesienkäsittely sekä Energia- ja ympäristötekniikka. Yksikön tutkimus keskittyy veden, energian ja maaperän ympäristötekniikkaan. Ratkaisuja haetaan pohjoisen pintavesiin, pohjavesiin, maankäyttöön, jäte- ja vesihuoltoon sekä jäteveden käsittelyyn. Tämän lisäksi tutkimus keskittyy muun muassa vesivaroihin, veden ja jäteveden käsittelyprosesseihin sekä geotekniikan ilmiöihin ja teorioihin.<sup>19</sup> Energia- ja ympäristötekniikan tutkimusryhmässä keskitytään älykkäisiin ja kestäviin

---

<sup>16</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Prosessimetallurgian tutkimusyksikkö, <https://www.oulu.fi/fi/prosessimetallurgia>

<sup>17</sup> Oulun Yliopisto 2021. Rakenteiden ja rakennusteknologian tutkimusyksikkö, <https://www.oulu.fi/construction/>

<sup>18</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Tuotantotalouden tutkimusyksikkö, <https://www.oulu.fi/fi/tuotantotalous>

<sup>19</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Vesi- ja ympäristötekniikan tutkimusryhmä, <https://www.oulu.fi/vesi/>

energiajärjestelmiin sekä kiertotalouteen. Erityisosaaminen liittyy älykkäisiin sähköverkkoihin, kriittisiin materiaaleihin, materiaaliveitoihin sekä kestävä kehityksen arviointiin erityisesti pohjoisesta ja arktisesta näkökulmasta.<sup>20</sup> Energiaryhmä on myös vahvasti profiloitunut hiilijalanjalan ja -kädenjalan tutkimukseen.<sup>21</sup>

Ympäristö- ja kemiantekniikan tutkimusyksiköstä löytyy kolme eri tutkimusryhmää: ympäristö- ja kemiantekniikka, epäorgaaninen kemia sekä säätötekniikka. Ympäristö- ja kemiantekniikan ryhmä keskittyy ensisijaisesti katalyyseihin, erotusprosesseihin, mallinnukseen sekä kestäviin yksikköprosesseihin. Epäorgaanisen kemian tutkimusryhmässä keskitytään synteettiseen ja rakenteelliseen epäorgaaniseen kemiaan sekä ympäristön epäorgaaniseen kemiaan. Säätötekniikka puolestaan suuntaa tutkimuksensa prosessien mallintamiseen ja hallintaan sekä erilaisiin tekoälyn teollisiin sovelluksiin sekä kehittyneeseen data-analyysiin.<sup>22</sup>

Älykkäät koneet ja järjestelmät -tutkimusyksikkö on yhdistelmä kahdesta tutkimusryhmästä, jotka ovat Mekatroniikan ja konediagnostiikan tutkimusryhmä sekä Systeemitekniikan tutkimusryhmä. Ensimmäinen keskittyy koneiden ohjaukseen tarvittaviin laitteistoihin ja menetelmiin sekä niiden hallintaan ja koneiden kunnon ja rasiustilan määrittämisen tutkimiseen. Jälkimmäinen puolestaan suuntautuu prosessiautomaation säätö- ja systeemitekniikan teoriaan, menetelmiin ja sovelluksiin. Erityisesti näitä tutkimuksia hyödynnetään energiatekniikan alalla.<sup>23</sup>

### 6.1.2. Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta

Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta on maailmanlaajuisestikin johtava ICT-alan tiedeyhteisö, jotka haluavat kehittää ja rakentaa kestävää sekä turvallista digitaalista tulevaisuutta. Tutkimus kohdistuu erityisesti mittaukseen, elektroniikkaan ja

---

<sup>20</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Energia- ja ympäristötekniikan tutkimusryhmä, <https://www.oulu.fi/energy/>

<sup>21</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Carbon footprint of the University of Oulu, <https://www.oulu.fi/en/projects/carbon-footprint-university-oulu>

<sup>22</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Ympäristö- ja kemiantekniikan tutkimusyksikkö, <https://www.oulu.fi/environmentalengineering/>

<sup>23</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Älykkäät koneet ja järjestelmät – tutkimusyksikkö, <https://www.oulu.fi/alykkaat/alykkaat>



materiaaleihin, 5G- ja 6G-langattomaan viestintään, tekoälyyn, järjestelmiin, ohjelmistoihin ja kokemuksiin.<sup>24</sup>

Tiedekunta jakautuu 12 tutkimusyksikköön, joiden tutkimusaiheet ja alat suuntautuvat laajasti eri aihealueisiin. Tutkimusyksiköt ovat<sup>25</sup>:

- Biomimetikka ja älykkäät järjestelmät
- CWC – Radioteknologia
- CWC – Verkot ja järjestelmät
- Empiirinen ohjelmistotuotanto ohjelmistoissa, järjestelmissä ja palveluissa
- Elektroniikan piirit ja järjestelmät
- Joka paikan tietotekniikka
- Käyttöliittymät ja ihmiskeskeinen digitalisaatio
- Konenäön ja signaalianalyysin tutkimuskeskus
- Optoelektronikka ja mittaustekniikka
- Sovellettu ja laskennallinen matematiikka
- Vakuuttavat verkko- ja mobiilipalvelut

Työssä kartoitettiin kahden tutkimusyksikön projekteja siitä näkökulmasta, että olisiko heillä käynnissä tutkimuksia, joilla voisi olla päästövähennyspotentiaalia. Mikroelektronikan tutkimusyksikkö on ollut mukana erilaisissa kestävä kehityksen teemoihin liittyvissä projekteissa, kuten Merenkulun ja Offshore-toiminnan ympäristötehokkuuteen sekä älykkäisiin ja kestäviin ruokapakkauksiin liittyvissä tutkimuksissa.<sup>26</sup> Myös optoelektronikan ja mittaustekniikan tutkimusyksiköllä on kestävä kehitykseen ja erityisesti uusiutuvaan energiaan vaikuttavia tutkimuksia, sillä esimerkiksi heidän painetun älykkyyden tutkimusryhmä on tutkinut erilaisia aurinkoenergiaan liittyviä aiheita.<sup>27</sup>

---

<sup>24</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta, <https://www.oulu.fi/fi/yliopisto/tiedekunnat-ja-yksikot/tieto-ja-sahkotekniikan-tiedekunta>

<sup>25</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Tieto- ja sähkötekniikan tutkimusyksiköt, <https://www.oulu.fi/fi/tst-tutkimusyksikot>

<sup>26</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Mikroelektronikan tutkimusyksikkö, <https://www.oulu.fi/microelectronics/res/projects>

<sup>27</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Optoelektronikan ja mittaustekniikan tutkimusyksikkö, <https://www.oulu.fi/eeng/node/13106>



### 6.1.3. Luonnontieteellinen tiedekunta

Oulun Yliopiston luonnontieteellisessä tiedekunnassa voi opiskella biologiaa, fysiikkaa, maantiedettä ja matematiikkaa. Tiedekunnalla on kuusi erillistä tutkimusyksikköä, jotka ovat<sup>28</sup>:

- Avaruusfysiikka ja tähtitiede
- Ekologia ja genetiikka
- Maantiede
- Matemaattiset tieteet
- Nano- ja molekyyliysteemit
- NMR-spektroskopian tutkimusyksikkö

Näistä tutkimusyksiköistä tässä työssä kartoitettiin kahta. Ekologian ja genetiikan tutkimusyksikkö tutkii erityisesti ilmastonmuutoksen vaikutuksia esimerkiksi eläinlajeihin ja luonnon monimuotoisuuteen. Tässä tutkimusyksikössä ei kuitenkaan haastatteluhetkellä ollut sellaisia tutkimusprojekteja, joita tässä työssä olisi voitu käydä läpi. Toinen läpikäytävä tutkimusyksikkö oli NMR-spektroskopian tutkimusyksikkö, joka on mukana esimerkiksi ympäristöystävällisemmän sementin kehitystyössä, jossa pyritään päästöttömän sementin kehittelyyn.<sup>29</sup>

## 6.2. Hiilijalanjälki Oulun Yliopistossa

Kuten moni muukin yliopisto ja ammattikorkeakoulu, myös Oulun Yliopisto on lähtenyt kehittämään toimintaansa kohti kestävämpää kampusarkea. Yliopistoilla on tutkimus- ja koulutuspaikkoina velvollisuus toimia roolimallina kohti hiilineutraaliutta sekä kestävä kehityksen lisääntymistä. Hiilijalanjälkilaskennan avulla saadaan parempaa tietoa organisaation tilasta ja laskennan ansiosta tilanteen analysointi laajemmin on mahdollista. Tätä varten Oulun Yliopistossa perustettiin hiilijalanjälkityöryhmä, joka suoritti hiilijalanjälkilaskentaa vuoden 2021 aikana. Tavoitteena on pienentää jalanjälkeä 50 % vuoteen 2025 mennessä, kun vertailuajankohtana pidetään vuotta 2019. Työryhmässä on

---

<sup>28</sup> Oulun Yliopisto, 2021. Luonnontieteellinen tiedekunta, <https://www oulu.fi/fi/yliopisto/tiedekunnat-ja-yksikot/luonnontieteellinen-tiedekunta>

<sup>29</sup> Oulun Yliopisto, 2019. NMR-tutkimusyksikkö, <https://www oulu.fi/nmr-spektroskopia/node/196875>

käynnissä useita tutkimuksia, ja hiilikädenjäljen laskemisen lisäksi ryhmä selvittää kampuustoimintojen, laboratorioden ja tutkimuslaitteiden sekä tieto- ja viestintätekniikan ja verkkojen hiilijalanjälkeä. Vuoden 2019 hiilijalanjäljeksi saatiin laskelmissa noin 17,5 tonnia CO<sub>2</sub>-ekv., joista suurin osa, eli 44 %, syntyy kaukolämmöstä. (Oulun Yliopisto, 2021a)

Oulun Yliopistolla on myös tiloja koskeva ympäristöohjelma, joka on ollut käytössä jo vuodesta 2006 lähtien. Vuonna 2016 sitä päivitettiin niin, että se täyttää WWF Green Office -sertifikaatin vaatimukset. Päärakennuksella tämä sertifikaatti on ollut vuodesta 2014. (Oulun Yliopisto, 2021b) Green Officen tarkoitus on toimia organisaation ympäristöjohtamisen välineenä. Ympäristöjärjestelmän luomisen ja kehittämisen jälkeen toimipiste auditoidaan, jonka jälkeen sertifikaatti myönnetään. Se kertoo organisaation toiminnasta ja siitä, että se vastaa ulkoisesti asetettuja kriteereitä, minkä lisäksi organisaatiossa on sitouduttu asioiden jatkuvaan parantamiseen. (WWF, 2021)

Hiilijalanjälkilaskentaa tehdään yhteistyössä Suomen Yliopistokiinteistöt Oy:n kanssa, sillä se omistaa Oulun Yliopiston käytössä olevat kiinteistöt. Kiinteistön omistajan vastuulla on esimerkiksi lämmön ja veden toimittaminen sekä osittain myös jätahuolto. SYK:llä on käytössään energianhallintapalvelu, jonka tarkoituksena onkin kiinteistöjen energiatehokkuuden kehittäminen. (Oulun Yliopisto, 2021b) SYK kertoo laskeneensa päästöjä vuoteen 2019 verrattuna ja esimerkiksi ostavansa päästösertifikaatteja markkinoilta. Kuudessa vuodessa (2013-2019) hiilijalanjälkeä on pienennetty noin 67 000 tonnia CO<sub>2</sub>-ekv, eli noin 40 %. Lisäksi SYK on mukana energiatehokkuussopimuksessa (TETS), joka perustuu vapaaehtoisuuteen. Suurin osa SYK:n päästöistä syntyykin kaukolämmön käytöstä (77 % vuonna 2019), joita kuitenkin kompensoidaan, ja esimerkiksi sähkö tulkitaan lähes kokonaan hiilineutraaliksi. SYK:n toiminnasta halutaan saada hiilineutraalia vuoteen 2030 mennessä. (Suomen Yliopistokiinteistöt Oy, 2021)

Myös Suomen yliopistojen rehtorineuvosto UNIFI ry., on julkaissut omat teesinsä kohti vastuullisempaa yliopistotyöskentelyä. Helmikuussa 2019 UNIFI kokosi kestävän kehityksen ja vastuullisuuden työryhmän, jotka määrittävät yhteiset periaatteet, tavoitteet ja toimintamuodot vastuullisuuden ja kestävän kehityksen edistämiseksi vuosien 2019-2020 aikana. Pohjana näissä tavoitteissa oli esimerkiksi Yhdistyneiden kansakuntien kestävän kehityksen tavoitteet, Suomen Sitoumus2050 sekä Pariisin ilmastopöytäkirja.

Visiona on, että vuonna 2030 suomalaisten yliopistojen kaikessa toiminnassa olisi otettu huomioon niin vastuullisuus kuin kestävä kehitysikin. Yliopistot olisivat hiilineutraaleja ja toimisivat suunnannäyttäjinä niin Suomessa kuin maailmallakin. (Unifi, 2021)

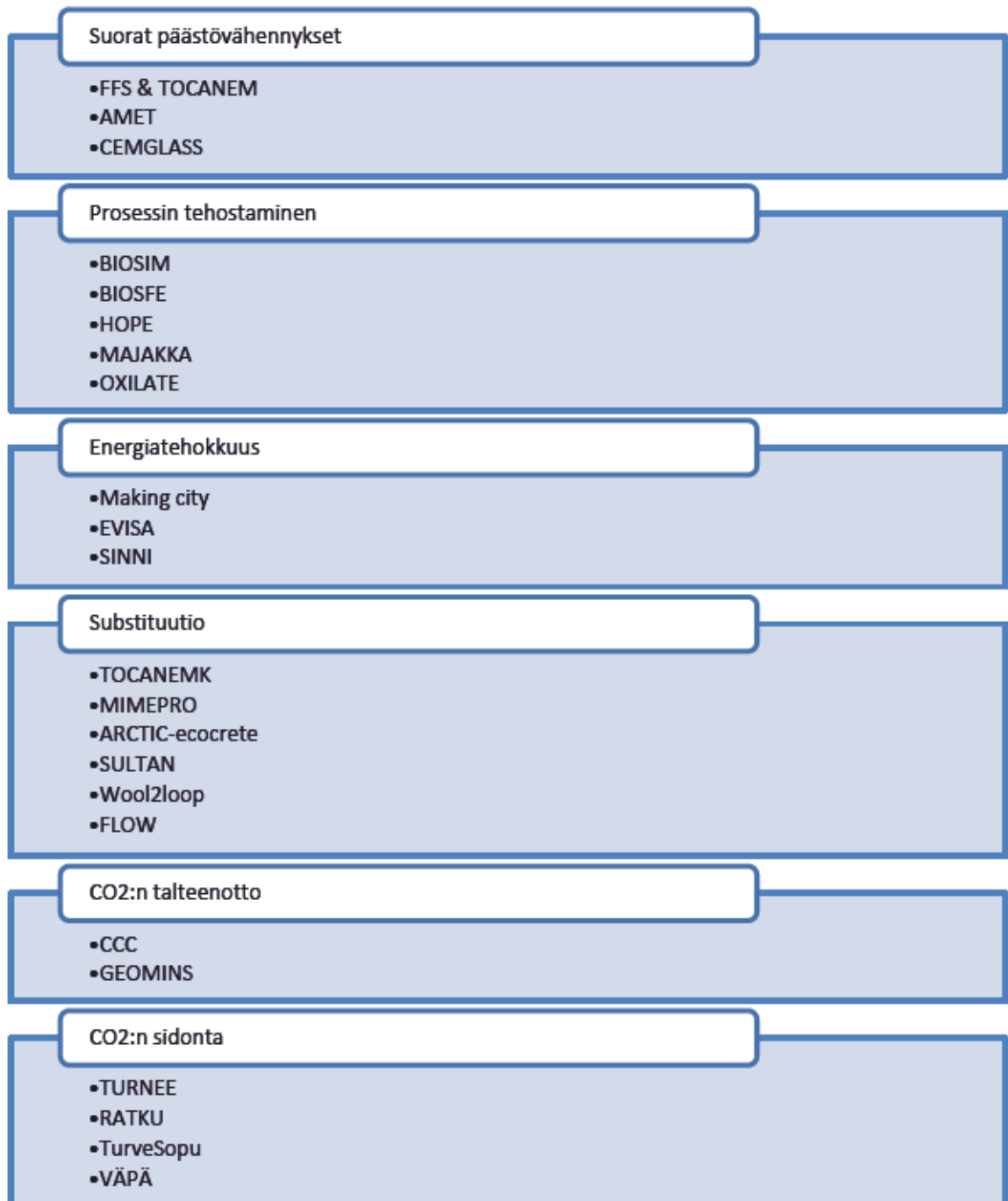
## 7. PÄÄSTÖVÄHENNYKSIIN TÄHTÄÄVÄT TUTKIMUSPROJEKTIT OULUN YLIOPISTOSSA

Oulun Yliopiston tutkimustyöhön liittyvää hiilikädenjälkeä kartoitettiin Teams-haastatteluiden ja tiedonkeruulomakkeen avulla. Mukana tutkimuksessa oli teknillisen tiedekunnan tutkimusyksiköt sekä kaksi tutkimusyksikköä sähkö- ja tietotekniikan tiedekunnasta sekä kaksi tutkimusyksikköä luonnontieteellisestä tiedekunnasta. Lähtökohtana oli perehtyä tarkemmin niiden tutkimusyksiköiden projekteihin, joilla on suoria tai muuten merkittäviä päästövähennysmahdollisuuksia ja jättää ulkopuolelle ne projektit, joilla päästövähennykset ovat erittäin epäsuoria ja vaikeasti arvioitavia.

Teams-haastatteluissa pohjana toimi liitteistä löytyvät Excel-tiedostot, johon tietoja täytettiin yhdessä tutkijoiden kanssa. Tärkeää oli selvittää, millaisista projekteista on kyse ja kuinka kauan ne kestävät. Lisäksi tärkeää oli arvioida tutkimuksella saavutettavia hyötyjä esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen tai hiilinielujen osalta sekä sitä, kuinka suuria nämä hyödyt voivat olla. Joissain tapauksissa päästövähennykset ovat epäsuoria tai niitä ei muista syistä pystytty tässä vaiheessa arvioimaan. Myös teknologioiden valmiustaso arvioitiin sekä se, millaisella aikataululla mahdolliset päästövähennykset olisi saavutettavissa. Mukana tiedoissa oli myös Oulun Yliopiston osuudet tutkimusprojekteissa, mutta niiden pohjalta ei vielä tässä työssä lähdetty määrittämään sitä, kuinka iso osuus hiilikädenjäljestä kuuluisi kullekin projektiin osallistuvalla taholla.

Tutkimusprojektit, joilla päästövähennyspotentiaalia pystyttiin arvioimaan, ryhmitellään ja käydään läpi sen mukaan, millaisilla keinoilla mahdolliset päästövähennykset tai hiilidioksidin sitominen tapahtuisi. Päästövähennyksissä keskitytään tämän tutkimuksen tapauksessa hiilidioksidipäästöihin ja niiden vähennysmahdollisuuksiin. Projektien ryhmittely on esitetty alla olevassa kuvassa 9. Päästövähennyskeinot on esitelty jo aiemmin ja tarkemmin luvussa 5.





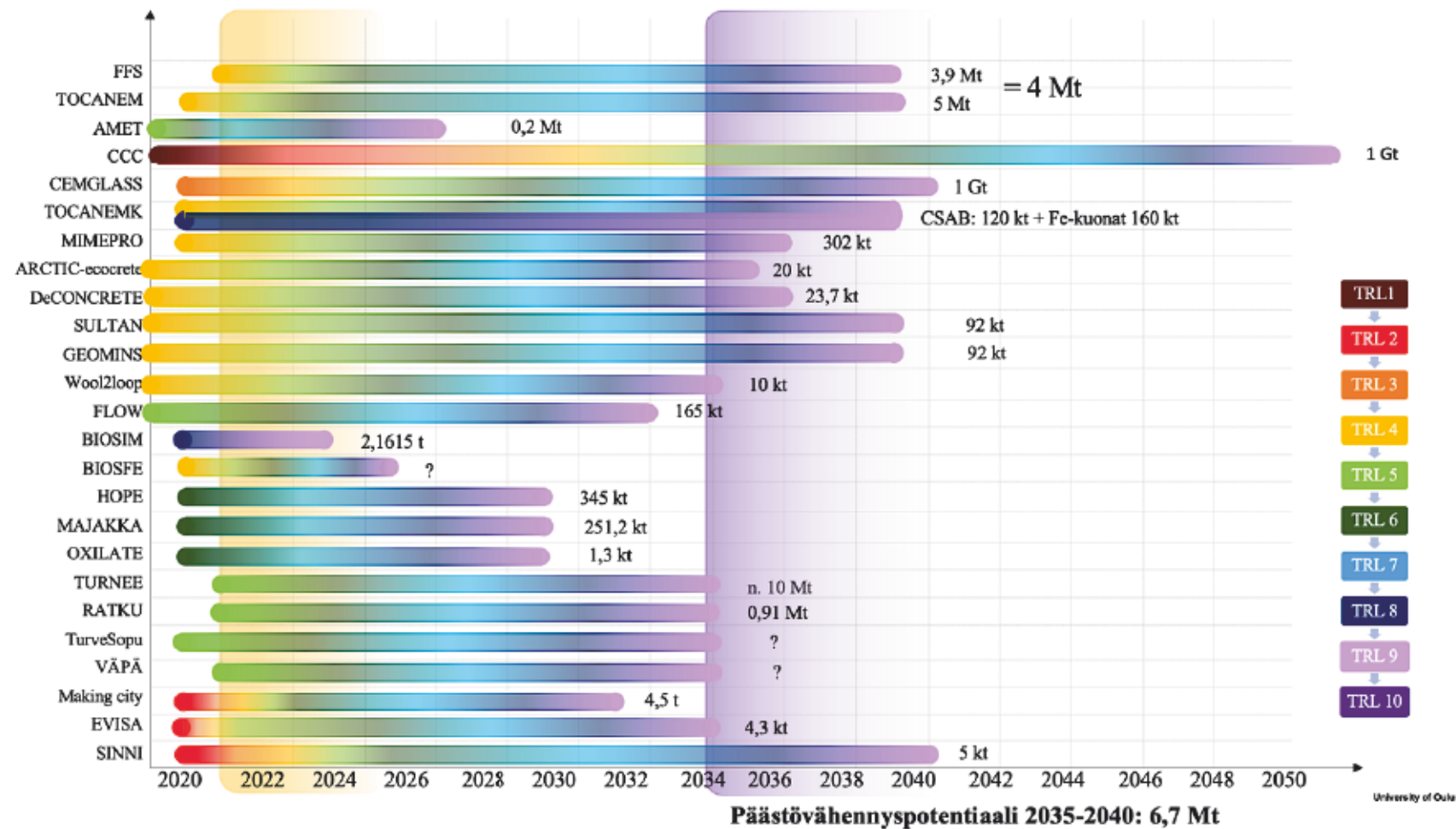
Kuva 9. Tutkimusprojektit jaoteltuna päästövähennyskeinojen mukaan

Tutkimusprojektit, joilla on päästövähennyspotentiaalia, on esitelty seuraavassa kuvassa 10, jossa ne on asetettu aikajalalle. Kuvassa projektien nimet on esitelty pystyakselilla ja niiden aikajana on esitelty TRL-tasojen avulla. Lähtötilannetta kuvataan kyseiselle tasolle sopivalla värillä ja aikajanan eteneminen TRL-tasojen välillä on hahmoteltu tasolle määritellyillä väreillä. Mikäli projektille on osattu arvioida esimerkiksi tavoite, jolloin

projekti saavuttaisi tietyn teknologisen valmiustason, sitä on hyödynnetty aikajanassa. Muuten aikajana perustuu oletukseen, että tasolta toiselle siirtyminen veisi noin kolme vuotta. Aikajana on siis laadittu arvioihin perustuen ja voi todellisuudessa muuttua, sillä tutkimusten edetessä myös teknologiatasot voivat edetä nopeastikin.

Aikajanalla olevalla keltaisella pystyssä palkilla kuvataan nykyistä hetkeä, jolloin hiilikädenjälkilaskentaa suoritetaan. Kuten aiemmin määriteltiin, tulisi tutkimuksen olla tarpeeksi pitkällä teknologisen valmiustason osalta, jotta sen päästövähennyspotentiaali voidaan laskea mukaan yliopiston hiilikädenjälkeen. Violetilla värillä on puolestaan kuvattu niitä vuosia, eli noin 2035-2040 välistä aikaa, jolloin tutkimuksen tulisi saavuttaa tai päästä lähelle TRL 9 -tasoa ja saavuttaa päästövähennystavoitteensa. Monen projektin tavoitteet osuvatkin juuri näille vuosille, viimeistään vuoden 2040 tienoille, joten tutkimusten voidaan ajatella tukevan myös Suomen hiilineutraaliustavoitetta. Tämän jälkeen osaamista voidaan tarjota myös muihin maihin, joissa hiilineutraaliuden saavuttaminen vaatii vielä lisätoimia.

Pyöristetty arvo lopullisen päästövähennyspotentiaalin suuruudesta on myös merkitty kuvan alareunaan. Jokaisen tutkimuksen kohdalla tarpeeksi tarkkaa arviota päästövähennyksistä ei pystytty tekemään, minkä vuoksi aikajanalalle ei ole voitu laittaa päästövähennyspotentiaalin suuruutta. Lisäksi aikajanalla on projekteja, kuten CCC ja CEMGLASS, joiden kohdalla päästövähennyspotentiaali vaatii vielä uudelleenarviointia myöhemmin, kun tutkimus on edennyt korkeammalle teknologisen valmiustason osalta. Näitä projekteja käsitellään myöhemmin tässä työssä tarkemmin.



Kuva 10. Tutkimusprojektit ja niiden päästövähennyspotentiaali kuvattuna aikajanalla

### 7.1. Suoriin päästövähennyksiin tähtäävät tutkimusprojektit

Suorien päästövähennysten kohdalla on kyseessä yleensä esimerkiksi uusi teknologia, jonka avulla päästöjä saadaan vähennettyä. Tällainen tilanne on metalli- ja terästeollisuudessa, jossa terästä valmistava teollisuuskonserni SSAB:n tarkoituksena on ottaa 2030-luvulla käyttöön uusi vähähiilinen teräksenvalmistusprosessi. Se perustuu vetytelkistykseen, minkä avulla päästöjä saadaan vähennettyä. Tällöin päästövähennykset ovat suoria ja teknologia onkin kehitetty juuri päästövähennysnäkökulmasta. (Paloneva & Takamäki, 2020, s.65)

Oulun Yliopistossa suoria päästövähennyksiä ilmenee FFS, TOCANEM ja AMET - tutkimusprojekteissa, joissa Prosessimetallurgian tutkimusyksikkö on mukana. Näiden projektien tarkoituksena on kehittää metallin ja teräksen valmistusta niin, että hiilidioksidipäästöjä saataisiin pienennettyä huomattavasti ja projekteilla on suoria päästövähennystavoitteita. Projekteja toteutetaan yhteistyössä useiden eri yritysten, esimerkiksi SSAB:n, kanssa.

Teräs- ja metalliteollisuuden kohdalla päästövähennysmahdollisuudet ovat merkittäviä ja toteutuessaan niillä olisi suuri vaikutus Suomen hiilineutraaliustavoitteissa. Hiilineutraaliuden tiekartassa onkin huomioitu terästeollisuuden muutokset ja tavoitteet, joiden mukaan koksen käyttö pelkistimenä korvattaisiin vedyllä tai elektrolyytisellä prosessilla. (Aakkula et al., 2020, s. 85) Erilaisia tekniikoita vähähiilisempään teräksenvalmistukseen on tutkittu myös Ruotsissa. Vuonna 2017 metalli- ja terästeollisuus oli suurin teollisuudenala, joka käytti tuotannossaan fossiilisia polttoaineita ja sen johdosta syntyneet hiilidioksidipäästöt vastasivat 38 % koko teollisuuden päästöistä. (Göransson et al., 2020) Suomessa tilanne on samankaltainen ja esimerkiksi vuonna 2019 metalliteollisuuden osuus teollisuuspäästöistä oli noin 33 %. (Tilastokeskus, 2020, s. 25)

Tulevaisuudessa terästeollisuus perustuisi rautamalmin pelkistämiseen vedyllä sekä kierrätetyn teräksen hyödyntämiseen. Perinteisesti rautamalmi pelkistetään ja sulatetaan masuunissa koksia käyttäen. Koksen palaessa energiaa tuottaen rautamalmi pelkistyy, kun hiili ja hiilimonoksidi sitovat rautaoksidien happea. Pelkistys tuottaa paljon hiilidioksidia, jonka määrää voitaisiin pienentää huomattavasti vetytelkistyksellä. Tässä tapauksessa hiilen sijasta käytetään vetyä, jolloin sivutuotteena syntyy vettä. Kierrätysteräs on jo



valmiiksi metallisessa muodossa, jolloin pelkistysvaihe voidaan sivuuttaa. Koska hiiltä ei käytetä valmistusvaiheessa tai kierrätetyn teräksen tapauksessa, voidaan niin kutsuttu rautasieni sulattaa valokaariuunissa masuunin sijasta. Valokaariuuni toimii sähkövirralla ja näiden soveltamista tutkitaan myös Oulun Yliopistossa käynnissä olevissa hankkeissa. (Oulun Yliopisto, 2020a)

Tulevaisuuden terästuotanto, kuten muukin teknologiateollisuus, tulee tarvitsemaan huomattavasti enemmän sähköä. Arvioidaan, että ostosähkö tulisi kasvamaan 2035 - vuoteen mennessä noin 50 %, joten päästötön sähköntuotanto on avainasemassa, että teknologiateollisuudessa vähähiilisyystavoitteet voidaan saavuttaa. Valtaosa energiatarpeesta on juurikin sähköä ja esimerkiksi metallinjalostuksessa sitä tullaan tarvitsemaan vedyn valmistukseen sekä työkonien sähköistämiseen. (Paloneva & Takamäki, 2020, s. 65)

Kuten aiemmin mainittiin, yksi terästeollisuutta uudistavista yrityksistä on ruotsalainen SSAB. Heidän HYBRIT-teknologian avulla on tarkoitus valmistaa fossiilivapaata terästä ja saada se markkinoille vuoden 2026 aikana. Koko yhtiö tavoittelee hiilineutraaliutta vuoteen 2045 mennessä. HYBRIT-hankeessa ovat mukana myös rautamalmintuottaja LKAB ja sähköntuottaja Vattenfall. Hanke käynnistyi vuonna 2016 ja siinä rautamalmipohjaisen teräksenvalmistuksen koksi korvataan vedyllä sekä fossiilivapaalla sähköllä. Tämän lisäksi tuotantolaitoksia tullaan muuttamaan tulevien vuosien aikana niin, että masuunit korvataan valokaariuunilla. (SSAB, 2020)

FFS-tutkimusprojekti käynnistyi vuoden 2021 aikana ja se tulee kestämään yhteensä neljä vuotta. Tavoitteena tutkimuksessa on siirtyä hiilipohjaisesta teräksen valmistuksesta hyödyntämään vetyä ja sähköä, jolloin hiilidioksidipäästöjä voitaisiin vähentää 3,9 Mt vuoteen 2040 mennessä. Lähtötaso FFS-projektin tutkimuksessa on neljä ja tavoitteena taso kuusi, eli tutkimuksen teknologia on laboratoriotasolla. Tavoitetason ollessa kuusi tarkoitus olisi, että tutkimuksen tuloksia voitaisiin testata oikeassa ympäristössä ja saada teknologiaa vietyä eteenpäin. Tutkimuksessa on mukana useampia yrityksiä, esimerkiksi SSAB, Ovako, Valmet, Fortum (Liite 1.)

TOCANEM (Towards Carbon Neutral Metals) -projekti puolestaan käynnistyi vuonna 2020 ja se kestää kolmen vuoden ajan vuoteen 2023 asti. Hiilineutraaliuden saavuttamiseksi suomalaiset metallinvalmistajat ovat lähteneet mukaan tutkimuksiin,

jossa pyritään löytämään keinoja hiilineutraalin metallintuotannon saavuttamiseksi. Tavoitteena tutkimusryhmällä on tarjota uusia keinoja sähkön ja vedyn hyödyntämiseksi metallin valmistuksessa erilaisten prosessi-innovaatioiden avulla. Projektissa on mukana useita yrityksiä sekä muita yliopistoja, kuten SSAB, Boliden Harjavalta Oy ja Boliden Kokkola Oy, Fortum, Lappeenrannan yliopisto, Åbo Akademi, Aalto-yliopisto sekä VTT. (Oulun Yliopisto, 2021c) TRL taso tutkimuksen alkaessa on neljä ja tavoitteena on päästä tasolle kuusi. (Liite 1.)

Näiden tutkimusprojektien tavoitteet ovat samankaltaiset, joten voidaan ajatella, että molemmat tähtäävät samoihin päästövähennystavoitteisiin ja tutkimusten yhteydessä esitetyt luvut ovat todellisuudessa samaa hiilikädenjälkeä. Suomessa valtaosa teknologiateollisuuden päästöistä syntyy metallin jalostuksessa sekä metallimalmien ja teollisuusmineraalien louhinnasta. Scope 1 -päästöt olivat vuonna 2018 noin 4 Mt hiilidioksidia. Suomessa. (Paloneva & Takamäki, 2020, s. 64-65) Tätä tarkastellessa voidaan arvioida, että vähennysmahdollisuus näiden tutkimusprojektien ansiosta olisi noin 4 Mt. vuodessa, kun huomioidaan myös Scope 2-päästöt. Tutkimukset ovat tarpeeksi myös pitkällä TRL-tason kannalta, joten Oulun Yliopisto voi tarjota tutkimustyötään ja saamiaan tuloksia yrityksen, eli SSAB:n käyttöön. Näin ollen hiilikädenjälkeä saadaan kasvatettua arviolta 4 Mt näiden tutkimusten osalta.

Prosessimetallurgian tutkimusyksikössä on käynnissä myös muita projekteja, kuten AMET, jossa pyritään kehittämään tekoäly- ja alustapohjaisia ratkaisuja metallurgiselle teollisuudelle. Projektissa on mukana useita teollisuusyrityksiä sekä tutkimustahoja, kuten SSAB, Ovako, Sapotech, Luxmet, Sensmet ja Åbo Akademi. Projektin tarkoituksena on kehittää teollisuusmittakaavaan sopivaa prosessin mallinnusta ja monitorointia, eli esimerkiksi prosessivalvonta- ja asiantuntijajärjestelmiä prosesseille. Tutkimuksessa keskitytään erityisesti teräksen valmistukseen, mutta tulokset voivat soveltua myös muihin metallurgian prosesseihin. (Oulun Yliopisto, 2020b) Päästövähennyspotentiaali tutkimuksella on arvioitu olevan noin 0,2 Mt hiilidioksidipäästöjä ja teknologinen valmiustaso tutkimuksella on arviolta viisi. Kuten FFS ja TOCANEM, myös AMET kasvattaa yliopiston hiilikädenjälkeä omalta osaltaan, arviolta 0,2 Mt. (Liite 1.)

Näissä metalli- ja terästeollisuuteen liittyvissä projekteissa on mukana myös esimerkiksi Materiaali- ja konetekniikan tutkimusyksikkö. Lisäksi Oulun Yliopistossa toimii vuonna

2006 perustettu tutkimusryhmä CASR (Centre for Advanced Steels Research), joka yhdistää tutkijoita ja osaajia esimerkiksi kemiallisen, mekaanisen sekä fysikaalisen metallurgian parista. Tämän lisäksi ryhmässä on mukana säätö- ja tietotekniikan sekä mallinnuksen osaajia. Yhteensä CASR:ssa on mukana noin 100 tutkijaa yhdeksässä eri tiedekunnasta. (Oulun Yliopisto, 2021d)

Metalli- ja terästeollisuuteen liittyvien tutkimusten lisäksi suoria päästövähennystavoitteita on myös Kuitu- ja partikkelitekniikan tutkimusyksikössä. CCC-tutkimuksessa on kyse fysikaalisten mekanismien tutkimisesta asetaatti-aktivoituneissa sementissä, jolla voitaisiin korvata nykyinen sementinvalmistus ja näin ollen pienentää hiilidioksidipäästöjä sementinvalmistuksessa. (Oulun Yliopisto, 2021e) Sementin valmistuksessa kuluu paljon energiaa ja esimerkiksi perinteinen Portland -sementti valmistetaan kalsinoimalla jauhattuja raaka-aineita jopa 1450 °C lämpötilassa. On oletettu, että lämpöenergian kulutus voisi olla noin 3,7 GJ tuotettua sementtitonnia kohden. Päästövähennyksiä sementin valmistuksen osalta voidaan saavuttaa kahdella eri tavalla. Ensimmäisellä menetelmällä käytössä olisi esimerkiksi lasimaisia jätemateriaaleja, joiden käyttö ei lisäisi merkittävästi energiankulutusta, vaan energiaa kuluisi noin 3,8 GJ/t. Näin ollen voitaisiin saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä, kun lasin kemiallisen koostumuksen ansiosta voitaisiin käyttää silikaattimineraaleja, jolloin ei synny välttämättömiä hiilidioksidipäästöjä, joita portland-sementin kohdalla vapautuu noin 500 grammaa tuotettua sementtikiloa kohden. Toinen keino on korvata perinteinen sementti alkali-aktivoitulla sementillä (AAC), joka koostuu alkaliliukoisesta alumiinioksidisilikaattilähteestä. Se reagoi puolestaan alkalin kanssa, joka on yleensä natriumsilikaattia. Kovettuessaan lopputuotteena saadaan betonia, jolla voi olla jopa 78 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä, kun verrataan AAC-sementtiä perinteiseen sementtiin. (Kinnunen et al., 2018)

Tutkimusprojektin kohdalla on esitetty arvio hiilidioksidipäästöjen pienentämisestä, joka olisi noin 1 Gt/vuosi maailmanlaajuisesti. Tämän tutkimuksen teknologian valmiustaso on arvioitu olevan nolla, eli tutkimus on vielä alussa ja vaatii lisäkehittelyjä. (Liite 4.). Yksi tuotettu kilo sementtiä tuottaa noin 0,8–0,9 kiloa hiilidioksidia. (Humphreys et al., 2003) Vuonna 2020 sementtiä tuotettiin maailmanlaajuisesti noin 4,3 Gt, (Gouy et al., 2021) eli päästöjä syntyi noin 3,87 Gt, jos yksi gigatonni sementtiä tuottaa noin 0,9 gigatonnia päästöjä. CCC-projektissa arvioitiin, että päästövähennys mahdollisuus olisi 1 Gt luokkaa, eli teknologian pitäisi saavuttaa suuri asema markkinoilla, jotta näin laaja



päästövähennys voitaisiin saavuttaa. Teknologiatason ollessa alhainen, tätä lukemaa ei voida vielä laskea mukaan hiilikädenjälkeen, vaan teknologian tutkimusta pitää jatkaa ja hiilikädenjäljen mahdollisuutta arvioida myöhemmin uudelleen.

Yhteensä suoriin päästövähennyksiin liittyvistä tutkimuksista voitaisiin siis saada arviolta 4,2 Mt suuruinen hiilikädenjälki, joka koostuu FFS-, TOCANEM- ja AMET -projekteista. Tämä arvio kädenjäljestä pohjautuu tutkimusten arvioituun päästövähennyspotentiaaliin, mutta lukema ei ole täysin absoluuttinen ja voi muuttua tutkimusten edetessä. Esimerkiksi CCC -tutkimuksen osuutta ei ole vielä tässä vaiheessa huomioitu mukaan hiilikädenjälkeen, mutta teknologian kehittyessä sen osuus voisi olla huomattava. Teräs- ja sementtiteollisuus ovat merkittäviä hiilidioksidipäästön aiheuttajia, joten niiden kehittäminen ja päästövähennyksiin tähtäävä tutkimustyö on tärkeässä asemassa. Molemmat teollisuuden alat aiheuttavat maailmanlaajuisesti noin 7 % kaikista hiilidioksidipäästöistä (Goodall, 2020, s. 116 & 119), joten näihin aloihin liittyvillä tutkimuksilla on myös suuria päästövähennysmahdollisuuksia.

## **7.2. Prosessin tehostamisella päästövähennyksiin tähtäävät tutkimusprojektit**

Prosessin tehostamiseen tähtääviä tutkimusprojekteja on käynnissä useampia Ympäristö- ja kemiantekniikan tutkimusyksikössä. Ensimmäinen tutkimusprojekti on BIOSIM, jossa pyritään optimoimaan biojalostamokonseptin energiankäyttöä, kehittämään simulaattoria sekä melassista biomuovin raaka-ainetta ja minimoimaan prosessin energiankulutusta. TRL-taso projektilla on kuitenkin jo melko korkea, jopa 8. Tavoitteena on 30 % pienempi sähkönkulutus laitoksessa. Tutkimuksessa pyritään saamaan valmiiksi pilottilaitos, jonka kulutus on noin 1,1 MWh luokkaa vuodessa ja lähivuosien aikana tuloksia pyritään hyödyntämään myös suuremman mittakaavan laitoksessa, jolloin sähkönkulutus voisi olla jopa 50 -kertainen. (Liite 2.) Jos tuleva laitos olisi 50 kertaa suurempi kuin pilottilaitos, olisi sähkönkulutus 55 MWh. Yhden megawattitunnin keskimääräinen päästökerroin olisi noin 131 kg hiilidioksidia. (Motiva, 2021) Eli tällöin hiilidioksidia syntyisi 7 205 kg ja tätä pystyttäisiin pienentämään 30 %, jolloin päästövähennyspotentiaali olisi 2161 kg. Tutkimuksen ollessa jo melko korkealla TRL-tasolla, joten tutkimus ei välttämättä kasvattaisi yliopiston hiilikädenjälkeä. Päästövähennyspotentiaalin suuruus on kuitenkin suhteellisen pieni verrattuna



hiilikädenjäljen kokonaismäärään, joten sen vuoksi sen mukaan laskemisella tai pois jättämisellä ei ole niin suurta merkitystä lopullisessa hiilikädenjäljessä.

Toinen projekti Ympäristö- ja kemiantekniikan tutkimusyksikössä on BIOSFE, jonka tarkoituksena on kehittää jatkuvatoimista ylikriittistä hiilidioksiduuttoa, jonka avulla selluteollisuuden sivuvirroista saadaan uutettua vahaa. Tämän tutkimuksen TRL-taso on arviolta neljän luokkaa, sillä tutkimusta on tehty kokeellisesti yhden litran kokoisella kattilalla. Tutkimuksen potentiaalina on 30 % pienempi sähkönkulutus ja 25 % pienempi vedenkulutus. (Liite 2.) Koska tutkimus on toteutettu yhden litran kattilalla, on sen päästövähennyspotentiaalia haastava arvioida todellisessa teollisuusympäristössä. Lisäksi kyse on osaprosessista, joten päästövähennyksen osuutta koko prosessissa ei voida vielä arvioida. Tutkimuksen edetessä ja teknologian kehittyessä voidaan saada tarkempi arvio päästövähennyksistä ja niiden osuudesta hiilikädenjäljen laskennassa, mutta tällä hetkellä arviota hiilikädenjälkeä varten on vaikea tehdä.

HOPE-projektissa puolestaan pyritään optimoimaan energiajärjestelmää niin, että sähkön ja lämmön kulutus sekä varastointi olisi tehokkaampaa. Energiajärjestelmät monimutkaistuvat ja niiden tehokas hallinta on haastavaa vaatien uusia työkaluja, joita tutkimuksessa pyritään kehittämään. Ympäristö- ja kemiantekniikan tutkimusyksikön lisäksi projektissa mukana ovat esimerkiksi Fortum, ABB ja Fidelix. Ratkaisuja kehitetään sekä Oulun että Espoon kaukolämpöjärjestelmissä. (Oulun Yliopisto, 2020c) Kaukolämpöjärjestelmillä saadaan joustoa energiajärjestelmiin useilla eri tavoilla, minkä lisäksi uusilla vähähiilisillä tuotantotavoilla ja varastoilla voitaisiin vähentää myös päästöjä. Arvio onkin, että päästöjä saataisiin laskettua runsaasti vuoteen 2035 mennessä. Vuonna 2050 päästöjä syntyisi enää jätteen ja sekapolttoaineiden tuotannosta ja kiertotalouden ansiosta sähkön ja kaukolämmön tuotanto olisi lähes päästötöntä. (Paloneva & Takamäki, 2020, s. 45–46) Tutkimuksen TRL-taso on kuusi ja tavoitteena on löytää keinot vähentää lämmitysenergiaa jopa 5 %. (Liite 2.) Vuonna 2020 kaukolämpöä tuotettiin 35 148 GWh. (Suomen virallinen tilasto (SVT), 2021) Jos tätä pystytään vähentämään 5 %, tarkoittaisi se 1757,4 GWh vähennystä. Kaukolämmölle on laskettu keskimääräinen päästökerroin, joka on noin 148 kg hiilidioksidia megawattituntia kohden. (Motiva, 2021) Tällöin tutkimuksen onnistuessa päästövähennyspotentiaali voisi olla 260036000 kg eli 260,036 kilotonnia hiilidioksidia.

Lisäksi käynnissä on MAJAKKA-projekti, jonka tarkoituksena on tuottaa niin sanottu työkalupakki yrityksille, jota he voivat hyödyntää omassa toiminnassaan. Työkalupakki sisältäisi erilaisia teknologioita hiilijalanjäljen pienentämiseksi ja näin ollen yritys voisi esimerkiksi vähentää omaa energiankulutustaan. Vähähiilisyystavoitteita voidaan saavuttaa esimerkiksi säätö- ja automaatiojärjestelmien avulla, jolloin tuotteista voidaan saada tasalaatuisempia sekä vähentää energian ja raaka-aineiden kulutusta. (Oulun Yliopisto, 2019a) Teknologian valmiustaso tutkimuksella on lähtötilanteessa noin kuusi. Työkalupakin avulla voitaisiin vähentää jopa 5 % teollisuuden sähkönkulutuksesta. (Liite 2.) Vuonna 2019 sähköä käytettiin teollisuudessa kokonaisuudessaan noin 38 350 GWh. (Suomen virallinen tilasto (SVT), 2020) Sähkölle on arvioitu päästökerroin, joka on noin 131 kg CO<sub>2</sub> / MWh. (Motiva, 2021) Näin ollen päästövähennys voisi olla 251,2 kt vuodessa teollisuuden sähkönkulutuksen kohdalla.

Viides projekti, jolla on päästövähennyspotentiaalia, on nimeltään OXILATE. Tutkimuksen tavoitteena on löytää keinoja älykkäiden palveluiden tehostamiseen esimerkiksi tietopohjaisten työkalujen, menetelmien, prosessien ja mallien avulla. (Oulun Yliopisto, 2020d) Biotuotelaitoksen osaprosesseissa tavoitteena on energiansäästö. TRL-taso tässä tutkimuksessa on kuuden kohdalla ja mukana projektissa on useita yhteistyökumppaneita sekä yrityksiä ympäri Eurooppaa. Vähennyspotentiaali tällä tutkimuksella on 5 % vähennys sähkönkulutuksessa, kun vuosittainen kulutus on arviolta 200 GWh luokkaa. (Liite 2.) Kun vähennettävä osa kerrotaan jo aiemmin käytetyllä sähkön päästökertoimella, eli 131 kg CO<sub>2</sub> / MWh, saadaan päästövähennyspotentiaalimääräksi noin 1,3 kt hiilidioksidia.

Prosessin tehostamiseen tähtäävillä projekteilla voitaisiin siis saavuttaa 514,697 kt suuruinen päästövähennys, kun mukaan lasketaan projektit BIOSIM, HOPE, MAJAKKA ja OXILATE. Nämä projektit ovat teknologisen valmiustason puolesta jo hyvin kehitettyjä, joten niiden vähennyspotentiaalia voidaan ajatella kasvattavan yliopiston tutkimustyöhön liittyvää hiilikädenjälkeä, minkä lisäksi päästövähennykset voidaan saavuttaa jo melko pian, muutaman vuoden sisällä. Myös näiden tutkimusten tapauksessa hiilikädenjäljen määrä voi vielä muuttua ja esimerkiksi BIOSFE -tutkimuksen osuutta voidaan tarkastella tutkimuksen ja teknologiankehityksen edetessä uudelleen. Prosessin tehostamiseen ja erityisesti sähkönkulutuksen vähentämiseen liittyvien päästövähennysten yhteydessä on otettava huomioon myös se, että sähkönkäytön uskotaan kasvavan merkittävästi. Toimialan ostetun sähkön määrä tulee kasvamaan

vuoteen 2035 mennessä noin 50 % ja jopa kaksinkertaistuvan vuoteen 2050 mennessä. (Paloneva & Takamäki, 2020, s. 65) Kenties sähkönkulutus olisi tulevaisuudessa vielä suurempaa ilman tällaisten tutkimusten tarjoamia ratkaisuja ja keinoja prosessin tehostamiseen.

### **7.3. Energiatehokkuuden parantamista tai energiansäästöä tavoittelevia tutkimusprojekteja**

Prosessin tehostamisen lisäksi päästövähennyksiä voidaan saavuttaa energiatehokkuutta parantamalla tai energiaa säästämällä. Tällaisia tutkimuksia Oulun Yliopistolla tehdään ainakin Vesi-, energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikössä. Käynnissä on kolme projektia: Making City, EVISA ja SINNI.

Making City projektissa tutkitaan niin kutsuttua PED-konseptia (Positive Energy District, energiapositiivinen alue) kahdessa ns. lighthouse (majakka) -kaupungissa, Oulussa ja Groningenissa. Energiapositiivinen alue voidaan määritellä alueeksi, jonka tuotu nettoenergia ja hiilidioksidipäästöt ovat nolla vuositason, minkä lisäksi uusiutuvaa energiaa pyritään tuottamaan ylituotannolla. Rajatulla kaupunkialueella on erityyppisiä rakennuksia sekä julkisia tiloja, joiden kokonaisenergiataseen tulisi olla positiivinen. Ylimääräinen energiantuotanto voidaan jakaa muille kaupunkialueille. Tutkimusprojektissa arvioidaan keinot, joita tällainen PED-konsepti tarvitsee toimiakseen, jonka jälkeen konsepti halutaan viedä myös kuuteen muuhun ns. seuraajakaupunkiin. (Making City, 2019a; Making City, 2019b)

Oulun Yliopiston Vesi-, energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikkö osallistuu Making city -tutkimuksessa Oulussa sijaitsevan asuinalueen, Kaukovainion, PED:n kehittämiseen tarjoamalla ratkaisuja, jolla asukkaat voisivat vähentää sähkönkulutustaan ja CO<sub>2</sub> -päästöjä. Tutkimus lähtee TRL-tasolta kaksi ja tavoitteena on päästä tutkimuksen lopussa tasolle kuusi. Arvioiden mukaan tutkimus voisi tuoda noin 4,5 tonnin hiilidioksidivähennyksen vuosittain. (Liite 3.) Koska tutkimuksella on tavoite vähentää hiilidioksidipäästöjä sähkönkulutusta optimoimalla ja energiaverkkoja kehittämällä, tämän kaltaisten ratkaisujen kehittäminen ja tarjoaminen kasvattaa Oulun Yliopiston hiilikädenjälkeä.



EVISA-projektissa kehitellään puolestaan työkaluja satamaan, jotta siellä voitaisiin pienentää hiilikädenjälkeä. Tarkoituksena on edistää energiatehokkaita ja hiilineutraaleja ratkaisuja Pohjois-Suomessa sijaitsevista satamista. Mukana tutkimuksessa on Oulun, Kalajoen, Raahen ja Outokumpu Oyj:n satamat sekä Suomen Satamaliitto. Tavoitteena on saada itsearviointityökalu, jolla satamat voivat laatia energianhallintasuunnitelma, arvioida omaa ympäristöjalanjälkeään sekä löytää satamakohtaisia ratkaisuja energiatehokkuuden parantamiseen ja ympäristökuormituksen pienentämiseen. (Oulun Yliopisto, 2020e) Tutkimuksen TRL-tason arvioidaan olevan tutkimuksen alussa kaksi, mutta tavoitteena on, että se saataisiin tutkimuksen aikana nostettua tasolle viisi. (Liite 3.)

Tutkimuksen päästövähennysten määrää on vielä hieman vaikea arvioida, mutta sen pohjana on käytetty muiden satamien, kuten Helsingin sataman tilannetta, jossa päästöjä on tarkoitus vähentää 32 % vuoden 2015 tasoon verrattuna. He myös tavoittelevat oman toiminnan hiilineutraaliutta vuoteen 2035 mennessä. (Kallonen, 2019) Esimerkiksi Raahen sataman hiilijalanjälki on tällä hetkellä noin 2300 tonnia hiilidioksidia vuosittain, josta voitaisiin vähentää esimerkiksi 35 % EVISA:n tulosten avulla, jolloin hiilijalanjälki pienenesi 805 hiilidioksiditonnia. Jos tutkimuksessa mukana olevat satamat onnistuisivat vähentämään myös noin 35 % päästöistään, kuten Raahen oletetaan vähentämään, olisi yhteinen vähennyspotentiaali noin 4300 tonnia vuosittain. Päästövähennykset voisivat olla vielä suurempia tulevaisuudessa, jos EVISA:ssa kehitellyt työkalut saataisiin käyttöön myös muissa satamissa. Suomen Satamaliittoon kuuluu yhteensä 27 satamaa, jolloin päästövähennyksiä voitaisiin saada myös tätä kautta ja lukema voisi olla jopa 30 000 tonnia. (Liite 3.) Arviot päästövähennyksistä ovat kuitenkin vielä epävarmoja ja myös tämän tutkimusprojektin kohdalla tarvitaan tarkempia laskelmia. EVISA:n kohdalla voidaan tässä vaiheessa ajatella olevan noin 4300 tonnin vuosittaiset päästövähennykset, jotka lasketaan mukaan Oulun Yliopiston hiilikädenjälkeen. Tätä lukemaa on arvioitava myöhemmin uudelleen, jolloin voidaan pohtia hiilikädenjäljen suuruutta, mikäli tutkimuksen tuloksia on hyödynnetty myös muualla kuin tutkimuksessa mukana olleissa satamissa.

SINNI-projektissa selvitetään, voidaanko haja-asutusalueilla muodostaa energiayhteisöjä. Nykyinen sekä tuleva rakennuskanta, jotka sijaitsevat pääteiden ja voimalinjojen läheisyydessä, voisivat mahdollisesti toimia virtuaalisina voimalaitoksina tai aurinkosähkön tuottajina. Tutkimusprojektissa tutkitaan aurinkopaneelien



sijoittamista rakennusten katoille ja tutkitaan, miten ne voisivat tuottaa energiaa. Tutkimuskohteet sijaitsevat Rovaniemellä ja kiinteistöjen omistajat voivat joko hankkia aurinkopaneelit itse tai vuokrata kiinteistönsä rakenteet energijärjestelmän alustaksi. Hajautettu energijärjestelmä tuo lisätuloja kiinteistöjen omistajalle, minkä lisäksi niiden avulla voidaan kehittää esimerkiksi sähköajoneuvoverkostoa. (Oulun Yliopisto, 2020f) Tutkimuksen TRL-taso on lähtötilanteessa kaksi ja sille tavoitellaan kolmostasoa. On arvioitu, että tutkimuksen ansiosta päästöjä voitaisiin vähentää noin 5 kilotonnia hiilidioksidia ja tämä tapahtuisi vuonna 2027.

Tässä vaiheessa energiansäästöön tähtääville tutkimuksille voidaan arvioida yhteensä noin 9,3 kilotonnin suuruinen päästövähennys. Nämä tutkimukset ovat vielä kesken, mutta TRL-tason puolesta niiden voidaan katsoa kasvattavan Oulun Yliopiston hiilikädenjälkeä, jos teknologian valmiustasoon liittyvät tavoitteet toteutuvat näillä tutkimuksilla. SINNI-projektin kehitys on tosin vielä melko varhaisessa vaiheessa, joten sen osuutta hiilikädenjäljessä tulee arvioida vielä lisää. Sen päästövähennyspotentiaalinen suuruus on kuitenkin suhteellisen pieni verrattuna hiilikädenjäljen kokonaismäärään, joten sen vuoksi sen mukaan laskemisella tai pois jättämisellä ei ole niin suurta merkitystä lopullisessa hiilikädenjäljessä.

#### **7.4.Substituution avulla päästövähennyksiä tavoittelevat tutkimusprojektit**

Substituution avulla saavutettavissa päästövähennyksissä on kyse siitä, että esimerkiksi hiili-intensiivinen materiaali voidaan korvata kestävämmällä ja vähäpäästöisemmällä materiaalilla. Yksi substituutiovähennysten kannalta merkittävä osa-alue on rakennusala, jossa erityisesti sementin ja betonin valmistaminen tuottaa hiilidioksidipäästöjä. Sementin kysyntä vuonna 2018 oli Suomessa noin 1,95 miljoonaa tonnia, josta suurin osa, eli noin 1,46 miljoonaa tonnia, tuotettiin Suomessa. Betoni puolestaan on eniten käytetty rakennusmateriaali ja sitä käytetään laajasti monenlaisissa kohteissa. (Ahlfors et al., 2020, s. 17 & 22)

Sementin valmistuksessa pääraaka-aineena käytetään kalkkikiveä, joka louhitaan, murskataan ja lajitellaan. Tämän jälkeen on vuorossa raakajauhatusta, sementtiklinkkerien poltto ja lopulta sementin jauhatusta. Valtaosa päästöistä syntyy valmistusvaiheessa; noin 60 % kalkkikiven kalsinoitumisesta ja 40 % polttoaineiden palamisesta. Kalkkikiven

poltto vaatii paljon energiaa, koska lämpötilat ovat korkeat ja lisäksi polton aikana kalsinoitunut kalkkikivi vapauttaa myös hiilidioksidia. Kuten aiemmin mainittiin, sementin valmistuksessa syntyy noin 0,8-0,9 tonnia hiilidioksidia jokaista tuotettua sementtitonnia kohden. Suomessa sementin valmistuksen aiheuttamat päästöt ovatkin noin 1,6 % Suomen kokonaispäästöistä ja maailmanlaajuisesti sementin valmistuksen osuus päästöistä on jopa 5-8 %, joten vähennyspotentiaalia on merkittävästi. (Finnsementti, 2029, s. 8-11, 13 & 17)

Sementin valmistusta tutkitaan, jotta ympäristöystävällisempiä tapoja löydetäisiin ja päästöjä saataisiin vähennettyä. Yhtenä mahdollisena keinona on polttoaineen vaihto uusiutuviin lähteisiin tai jättemateriaaleihin. Suomessa onkin korvattu jo noin 40 % polttoaineista uusiutuvilla tai jättemateriaaleilla. Mikäli kaikki polttoaine vaihdettaisiin uusiutuviin, vähenisivät päästöt jo noin 40 %. Tämän lisäksi raaka-aineita voidaan osittain korvata esimerkiksi kuonalla tai masuunikuonalla, jota on Suomessa hyödynnetty jo jonkin verran, mutta masuunikuonan määrä tulee vähenemään terästeollisuuden vetypohjaisen teknologian ansiosta. Sementinvalmistukseen on kehitteillä myös vaihtoehtoisia reseptejä, jolloin päästöjä saadaan alennettua. (Ahlfors et al., 2020, s.17-19)

Aiemmin suoriin päästövähennyksiin tähtäävien tutkimusprojektien kohdalla esiteltiin TOCANEM -projekti, jossa on mukana myös Oulun Yliopiston Kuitu- ja partikkeliteknikan tutkimusyksikkö. Projektissa on suorien päästövähennysten lisäksi mahdollisuus substituutiovähennyksiin, sillä rautapitoisten kuonien hyötykäyttöä geopolymeereissä pyritään kehittämään muun tutkimuksen mukana. Kyseisen tutkimuksen TRL-taso on neljä ja vuoteen 2040 mennessä teknologialla odotetaan 120 kt vuosittaisia hiilidioksidin päästövähennyksiä. (Liite 4.) Yksiosaisten geopolymeerien eli alkaliaktivoitujen materiaalien ympäristövaikutukset on todettu pienemmiksi kuin kaksiosaisten tai perinteisen OPC-sementin, mutta seoksen suunnittelu on erittäin tärkeää ja erityisesti aktivaattorilla on suuri merkitys ympäristövaikutuksiin. Kaksiosaisten geopolymeerien ongelmana on yleensä se, että niiden prosesseissa käytetään syövyttäviä, viskooseja ja muuten vaikeasti käsiteltäviä aktivaattoreita, jolloin yksiosainen geopolymeeri voisi vähentää päästöjä, sillä sen kuivaseokseen lisättäisiin vain vettä. (Fabritius et al., 2019)

Geopolymeeri -termiä käytetään yleisesti amorfisista kiteisistä reaktiotuotteista. Ne on syntetisoitu alkalialumiinisilikaattien kanssa synteessissä joko alkalihydroksi- tai alkalisilikaattiliuoksen kanssa. Tällaisista materiaaleista voidaan käyttää myös useita muita nimiä, mutta tutkimusprojekteissa tutkijat ovat käyttäneet nimitystä geopolymeeri, joten sitä käytetään myös jatkossa tässä työssä. Geopolymeerien ominaisuudet riippuvat valituista raaka-aineista sekä niiden käsittelyolosuhteista, eikä kaikkia ominaisuuksia esiinny jokaisella geopolymeerillä. Ominaisuuksia voivat olla korkea puristuslujuus, alhainen kutistuvuus, nopea tai hidas kovettuminen, materiaalin palon- tai haponkestävyys sekä alhainen lämmönjohtavuus. Geopolymeerisaatio sisältää useita vaiheita. Ensin kiinteä alumiinisilikaatti liuotetaan alkalisen hydrolyysin ja veden kanssa, jolloin syntyy aluminaatteja ja silikaatteja. Näin saadaan aikaiseksi tasapainotettu liuos, josta vettä poistamalla ylikyllästynyt alumiinisilikaattiliuos muodostaa geelin. Geeliytymisen jälkeen aine uudelleenjärjestäytyy ja saadaan aikaan kolmiulotteinen alumiinisilikaattiverkko. (Duxon et al., 2007)

Geopolymerisaation lisäksi TOCANEM -tutkimusprojektissa on mukana myös CSAB-sementin valmistukseen liittyvää tutkimustyötä. Kalsiumsulfoaluminaattibeliitti-, eli CSAB -sementissä voitaisiin hyödyntää terästeollisuudesta tulevaa masuunikuonaa, jolloin sementissä olisi vähemmän kalsiumia. On tutkittu että CSA, eli kalsiumsulfoaluminaatti -sementillä voisi olla noin 25-35 % vähemmän päästöjä kuin perinteisellä sementillä. (Bannerman et al., 2017) TOCANEM-projektissa CSAB-sementissä käytettäisiin rautapitoisia kuonia ja tämän teknologian valmiustaso on jopa seitsemän tai kahdeksan, eli tutkimus on edennyt jo melko pitkälle. Päästövähennyksen arvioitu määrä voisi vuoteen 2040 mennessä olla 160 kt hiilidioksidia vuosittain, sillä rautakuonia syntyy vuosittain jopa 800 kilotonnia, joista noin puolet voitaisiin käyttää CSAB-sementin valmistukseen. (Liite 4.)

Toinen metalleihin liittyvä tutkimus, jota Kuitu- ja partikkeliteknikan tutkimusyksikössä tehdään, on MIMEPRO, jossa tutkitaan metallien talteenottoa sivuvirroista ja sitä, miten mineraalisia sivuvirtoja voitaisiin hyödyntää rakennustuotteissa. Tutkittavia sivuvirtoja ovat esimerkiksi kuonat, jätteenpolton tuhkat, biotuhkat, viherlipesäkkeet sekä soodakattilan suola ja tarkoituksena olisi löytää keinoja kierrättämiseen tai uusiokäyttöön kaatopaikkojen tai läjityksen sijaan. Tutkimuksella on vaikutusta useisiin teollisuuden aloihin ja niiden päästöihin, kuten rakennus-, metalli-, energia- sekä massa- ja paperiteollisuuteen. (Oulun Yliopisto, 2020g) Tutkimusprojektissa ovat mukana myös



Prosessimetallurgian sekä Kestävän kemian tutkimusyksiköt, jotka tutkivat metallien talteenottoa sivuvirroista, jotta niitä voitaisiin hyödyntää rakennustuotteissa. Lisäksi mukana on useita yrityksiä, kuten Fortum, Metsä, Valmet, Stora Enso ja Matnur. Tutkimuksen TRL-taso on neljä ja päästövähennyspotentialiaali olisi noin 302 kilotonnia vuodessa ja se olisi saavutettavissa vuonna 2030. Vähennykset saavutettaisiin sillä, että 200 kt masuunikuonaa ja 50 kt lentotuhkaa voitaisiin hyödyntää sementinvalmistuksessa, sillä näitä tuhkia syntyy yhteensä jopa 600 kt vuosittain (Lötjönen & Tikkanen, 2013). Alkaliaktivaattoreita voitaisiin korvata vihreälipeäsakalla sekä soodakattiloiden suolalla, minkä lisäksi hiiltä voitaisiin sitoa 300 kilotonniin tuhkaa, jolloin tonni tuhkaa voisi sitoa noin 100 kg hiilidioksidia. (Liite 4.) Hiilensidontaan liittyviä projekteja esitellään lisää myöhemmin.

OPC-sementin korvausta tutkitaan myös esimerkiksi ARCTIC-ecocrete -projektissa, jossa kehitetään masuunikuonan hyödyntämistä sementin valmistuksessa. Erityisesti haasteena tässä on sementin käyttö pohjoisissa olosuhteissa, jolloin esimerkiksi kylmässä työskentely vaatii sementiltä erilaisia ominaisuuksia ja paljon energiaa, mikä kasvattaa myös hiilidioksidipäästöjen määrää. Projektissa kehitetään ympäristöystävällisempiä sideainereseptejä ja valutekniikoita, jotka sopivat paremmin pakkasolosuhteisiin. (Oulun Yliopisto, 2021f) Tähän tutkimukseen liittyy myös jo aiemmin esiteltyt yksiosaiset alkaliaktivoitavat materiaalit. TRL-taso tutkimuksessa on 4 ja vähennyspotentialiaali olisi noin 20 kt luokkaa vuodessa. Tutkimuksessa hyödynnettävää granuloitua masuunikuonaa syntyy noin 500 kilotonnia vuosittain ja jos siitä voitaisiin valmistaa 50 kilotonnia geopolymeeriä, jolla korvattaisiin perinteistä sementtiä, voisi päästövähennys olla mahdollinen. (Liite 4.)

DeCONCRETE -tutkimusprojekti liittyy myös ympäristöystävällisemmän betonin valmistukseen, sillä projektin tarkoituksena on tutkia purkubetonin hyödyntämistä ja karbonointia eli hiilen mineralisointia. Mukana DeCONCRETE:ssa on tutkijoita Oulun Yliopiston lisäksi sekä Venäjältä että Norjasta. Oulun Yliopiston osuus liittyy erityisesti betonijätteen käsittelyyn ja prosessointiin sekä kierrättämiseen. (Northern (Arctic) Federal University, 2021) Suomessa syntyy vuosittain betonijätettä aina 700 000 tonnista jopa miljoonaan tonniin. Betonijätteen hyödyntäminen on kehittynyt, ja sitä käytetäänkin jopa 80%, mutta jätteeksi päätyy silti vielä paljon käyttökelpoista materiaalia. (Vakkuri, 2011) Tutkimuksessa arvioidaan, että Suomessa 20 000 tonnia voitaisiin korvata purkubetonista valmistetulla materiaalilla. Lisäksi arvioiden mukaan yksi tonni



purkubetonia voisi sitoa 11 kiloa hiilidioksidia itseensä. (Kikuchi & Kuroda, 2010) Tällöin sementtiä korvatta purkubetonilla, voitaisiin saavuttaa 16 kt päästövähennykset ja mikäli purkubetoni sitoo itsensä hiilidioksidia aiempien arvioiden verran, olisi päästövähennys Suomessa 7 700 tonnin luokkaa. Yhteensä päästövähennykseksi saataisiin siis 23,7 kt hiilidioksidia. TRL-taso tällä tutkimusprojektilla on 4. (Liite 4.)

Kaivostoiminnasta syntyy paljon kivi- ja maajätettä. Vuonna 2017 kaivosteollisuus irrotti maaperästä jopa 124 miljoonaa tonnia maa-ainesta ja valtaosa tästä päättyi lopulta kuitenkin kaatopaikalle. Kyseisenä vuonna jopa 71 % kaivosteollisuuden kokonaisnostosta sijoitettiin kaatopaikalle ja vain pieni osa sivukivestä kierrätetään. (Espo et al., 2019) Tähän ratkaisuja pyritään löytämään SULTAN-projektissa, jossa tutkitaan rikastushiekkojen geopolymerisointia. Rikastushiekasta pieni osa, noin 1 %, voitaisiin hyödyntää sementin korvaajana tulevaisuudessa. Vaikka määrä on prosentuaalisesti pieni, voisi se tuoda 92 000 tonnin päästövähennyksen, sillä rikastushiekkoja syntyy jopa 23 000 000 tonnia vuosittain. Myös tämän tutkimuksen TRL-taso on neljä ja se vaatii kehittelyä, sillä arvio sementin korvattavuudesta toteutuisi noin 20 vuoden kuluttua. (Liite 4.)

Wool2loop – hankkeessa pyritään myös löytämään korvaavaa materiaalia perinteiselle OPC-sementille. Projektissa tutkitaan mineraalivillojen geopolymerisointia, jossa jätteeksi päätyvät mineraalivillajätteet hyödynnettäisiin rakennusteollisuudessa. Alkaliaktiivoinnilla mineraalivillajäte voitaisiin muuttaa keraamisiksi tai betonin kaltaisiksi materiaaleiksi. Mineraalivillageopolymeeribetonilla arvioidaan olevan 80 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin perinteisellä betonilla. (Wool2loop, 2020) Hanke on laaja Eurooppalainen projekti, jossa on Suomesta mukana esimerkiksi Saint Gobain yritys. TRL-taso myös tässä projektissa on neljä ja on arvioitu, että mineraalivillasta saatavalla materiaalilla voitaisiin korvata vuosittain 20-30 kt perinteistä sementtiä. Päästövähennyspotentiaali olisi siis noin 10 000 tonnia vuodessa Suomen mittakaavassa ja tämä olisi mahdollista saavuttaa vuoden 2025 kohdalla. (Liite 4.)

Terästeollisuuden kuonaa ja sen hyödyntämistä sementin korvaamisessa tutkitaan myös FLOW-hankkeessa, jossa tavoitteena on kehittää uusia alkaliaktivoituja vaahtoja, jotka valmistetaan uusioraaka-aineista. Materiaaleja voitaisiin hyödyntää erilaisissa lämpöä ja ääntä eristävissä tuotteissa. Tällaiset kevyet materiaalit ovat usein hauraita, mutta tätä ongelmaa pyritään ratkaisemaan hyödyntämällä orgaanisia kuituja biopohjaisista

uusiutuvista lähteistä, jolloin saadaan ympäristöystävällisempiä tuotteita rakentamiseen. (Oulun Yliopisto, 2020h) Mukana tutkimuksessa on esimerkiksi SSAB, Saint-Gobain ja Kiertokaari. Kuonia syntyy yhteensä noin 400 000 tonnia vuodessa, kun masuunikuonaa ei huomioida. Jos puolet näistä kuonista soveltuisi sementin korvaamiseen, voisi päästövähennyspotentiaali olla noin 165 000 tonnia vuodessa Suomessa. Lisäksi SSAB pilotoi hanketta hiilidioksidin sidontaan, jolloin hiilensidontapotentiaali voisi olla noin 5000 tonnia vuodessa. Teknologian valmiustaso tutkimukselle on arviolta neljä ja viisi. (Liite 4.)

Yhteensä substituutiovähennyksillä voitaisiin saavuttaa siis noin 732,7 kilotonnin päästövähennykset hiilidioksidin suhteen. Suurin osa näistä tutkimuksista liittyy erilaisiin sementinkaltaisiin materiaaleihin, joiden avulla pyritään löytämään keinoja korvata perinteinen sementti. Tutkimukset ovat melko alussa ja niihin liittyy epävarmuuksia, joten hiilikädenjäljen kehittymistä näiden projektien kohdalla tulisi seurata jatkossa. Näiden tutkimusten päästövähennykset olisivat hyödynnettävissä vasta vuoden 2035 jälkeen, joten myös toteutumista tulisi tarkastella myöhemmin.

## **7.5. Hiilidioksidin hyödyntämiseen tai varastointiin liittyvät tutkimukset**

Oulun Yliopistolla on hiilidioksidin varastointiin tai hyödyntämiseen liittyviä tutkimuksia. Hiilineutraaliutta tavoitellessa hiilidioksidin varastointi on tärkeää, mutta siihen liittyy myös haasteita ja epävarmuuksia. Kuitenkin sen puuttuminen johtaisi tulevaisuudessa todella tiukkoihin päästövähennystoimiin tulevaisuudessa ja erityisesti maataloudessa sekä teollisuusprosesseissa tämä voisi olla haastavaa teknillis-taloudellisesta näkökulmasta. (Hildén et al., 2019, s. 129)

CEMGLASS -tutkimus on yksi Kuitu- ja partikkelitekniikan tutkimusyksikön tutkimuksista ja siinä tavoite on tutkia ilmiöitä, joita voidaan hyödyntää hiilidioksidia sitovissa sementeissä. Tutkimuksessa yhdistetään faasien mukaan eroteltuja laseja, joilla on viritettävät nanorakenteet. Tämän jälkeen luodaan yhteys lasin morfologian ja reaktiivisuuden välille sekä tutkitaan kestävyyttä sekä hiilidioksidin hyödyntämistä sementin kaltaisissa tuotteissa. Reaktiivinen magnesiumsilikaattilasi reagoi veden ja vähäisten aktivaattoreiden kanssa, jolloin se voi jähmettyä ja muodostaa kestäväen reaktiotuotteen sekä sitoa samalla hiilidioksidia itseensä mineralisaation avulla. Mikäli

tällainen nanorakenteinen lasikonsepti onnistutaan luomaan, voisi sillä olla suuri merkitys hiilidioksidin talteenoton kannalta. (Oulun Yliopisto, 2019b)

Tutkimuksen ansiosta sementtiä voitaisiin valmistaa negatiivisilla nettohiilipäästöillä ja varastointipotentiaaliksi on arvioitu jopa 1 Gt vuosittain maailmanlaajuisesti. TRL-taso tutkimuksella on kuitenkin kolme, eli menetelmän käyttöönotto kaupallisella tasolla on vielä pidemmän kehityksen takana. (Liite 4.) Mukana projektissa on myös tutkijoita Sheffieldin yliopistosta sekä Lontoon Imperial Collegesta. (Oulun Yliopisto, 2019b) Kuten aiemmin käsitellyssä CCC-projektissa, myös tässä hiilidioksidin vähennyspotentiaali olisi noin 1 Gt, eli merkittävä osa sementinvalmistuksesta pitäisi korvata tällä teknologialla. Koska tutkimus on vielä alussa, ei sen osuutta hiilikädenjälkeen pystytä vielä arvioimaan. Teknologian kehittyessä sillä voi kuitenkin olla merkittävä potentiaali päästövähennyksissä ja kuten CCC-tutkimuksen kohdalla, myös tämän tutkimuksen kehitystä on seurattava jatkossa. Mikäli teknologia kehittyy tarpeeksi ja sillä voisi olla kaupallinen potentiaali, voisi se kasvattaa Oulun Yliopiston hiilikädenjälkeä melko suurestikin.

Toinen hiilidioksidin hyödyntämiseen tai varastointiin liittyvä projekti tutkii rikastushiekkojen geopolymerisointia ja hiilen sidontaa. Rikastusprosessiin liittyvässä GEOMINS-projektissa osa rikastushiekasta voisi karbonoitua, jolloin se sitoisi samalla itseensä hiiltä. Näin saataisiin luotua betonin tai keraamien kaltaisia materiaaleja, eli geopolymeerejä. Magnesiumpohjaisilla rikastushiekoilla voitaisiin luoda rakeita, jotka vastaavat lujuudeltaan jo markkinoilla olevia kaupallisia kevyitä runkoaineita. Rikastushiekkojen mineralogian ansiosta niiden rakenteeseen voidaan lisätä hiilidioksidia. (Oulun Yliopisto, 2021g) Tutkimus linkittyy aiemmin esiteltyyn SULTAN-projektiin, jossa tutkittiin geopolymerisoitujen rikastushiekkojen potentiaalia sementin korvaajana. Oletamus GEOMINS-projektissa on, että yksi tonni rikastushiekkaa voisi sitoa itseensä yhden kilon hiilidioksidia. Tällöin varastointipotentiaali voisi olla noin 94 300 tonnia vuodessa. TRL-taso tutkimuksella on 4. (Liite 4.) Jotta näihin hiilensidontamääriin voitaisiin päästä, vaatisi tilanne kuitenkin sen, että rikastushiekkoja käytettäisiin runsaasti tutkimuksen kehittämään tarkoitukseen. Rikastushiekkaa syntyy kuitenkin erittäin paljon, joten sen vuoksi käyttömahdollisuus on merkittävä, mikäli teknologiat sen hyödyntämiseen toimivat.



Hiilidioksidin varastointiin tai sitomiseen liittyvistä projekteista hiilikädenjälkeä voisi kertyä siis noin 94,3 kilotonnia vuosittain. CEMGLASS-projekti on vielä niin alussa ja sen päästövähennysmahdollisuudet tarvitsevat vielä lisätutkimuksia ja tarkasteluja, minkä jälkeen ne voitaisiin huomioida hiilikädenjäljessä. GEOMINS-projektilla on jo tarkempia laskelmia, mutta myös sen osalla on epävarmuuksia teknologian kehitystasoon ollessa vielä suhteellisen matala. Molemmilla projekteilla on kuitenkin merkittäviä mahdollisuuksia vähentää hiilidioksidia jatkossa, mikäli teknologioita saadaan kehitettyä lisää ja mahdollisesti vietyä myös markkinoille.

## **7.6. Luonnon hiilivarastoihin liittyvät tutkimukset**

Hiilidioksidia voidaan sitoa myös luontoon, esimerkiksi metsiin. Hiilivarasto terminä tarkoittaa kasvillisuuteen, maaperään ja kasveista valmistettuihin tuotteisiin kertynyttä hiiltä, joka on sitoutunut niihin fotosynteesin aikana. Mikäli maaperän tai kasvillisuuden hiilivarasto kasvaa, eli sinne sitoutuu enemmän hiiltä kuin sieltä poistuu, on kyseessä hiilinielu. (Luonnonvarakeskus, 2021a) Tärkeimpiä hiilinieluja maapallolla ovat metsät ja meret, sillä levät ja kasvit muuttavat hiilidioksidia omaksi biomassaksi fotosynteesin aikana. Meriin liukenee hiilidioksidia myös sellaisenaan tai muissa epäorgaanisissa muodoissa, minkä lisäksi maaperä voi sitoa jonkin verran hiilidioksidia itseensä. Se kuitenkin myös vapauttaa hiilidioksidia ja ihmisen toiminnalla onkin suuri vaikutus hiilinielujen toiminnassa ja hiilen sidonnassa, sillä esimerkiksi metsiä istuttamalla saadaan lisättyä hiilen sidontaa ja hiilinielujen määrää, kun taas metsien hakkuut vapauttaa hiilidioksidia takaisin ilmakehään. (Suomen ympäristökeskus, 2021c)

Ilmastonmuutoksen torjunnassa hiilinieluilla on tärkeä rooli, sillä ilman niitä hiilineutraaliustavoitteen saavuttaminen on erittäin vaikeaa. Mikäli hiilinieluja saadaan lisättyä runsaasti, voidaan päästä myös negatiivisiin päästöihin, jolloin hiilidioksidia sitoutuu enemmän kuin vapautuu. Suomessa turvemaat ovat merkittäviä hiilivarastoja ja niiden käytön parantamisella ja muuttamisella kestävämmäksi voitaisiin vähentää merkittävästi maa- ja metsätalouden päästöjä. (Luonnonvarakeskus, 2021a) Luonnon hiilivarastoihin ja erityisesti turvemaihin liittyviä tutkimusprojekteja on käynnissä useampia Vesi-, energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikössä Pohjoisen hydrologian tutkimusryhmässä.



TURNEE-projektissa on kyse juurikin hiilinieluista ja päästöjen hillinnästä liittyen turvemaihin. Erityisesti tutkimus keskittyy siihen, kuinka paljon turvemaita metsittämällä ja hoitamalla voidaan sitoa kasvihuonekaasuja ilmasta. Ennallistamalla reheviä metsäojitettuja soita ja metsittämällä käytöstä poistuvia suopohjia voidaan kasvattaa hiilidioksidin sidontaa. Mukana projektissa ovat muun muassa Helsingin Yliopisto, Ilmatieteenlaitos, LUKE, Seinäjoen ammattikorkeakoulu sekä metsän- ja maanomistajat. (Maa- ja metsätalousministeriö, 2021) TRL-taso tutkimuksella on noin viiden luokkaa, sillä tutkimusta tehdään turvemaille perustetuilla mittausasemilla. (Liite 5.)

Vuonna 2018 LULUCF-sektori muodosti 10 Mt CO<sub>2</sub>-ekv. nettoniehu. Ojitetuista turvemaista aiheutui vuonna 2019 noin 13,3 Mt hiilidioksidipäästöt, jos mukaan ei huomioida metsiksi luokiteltujen turvemaiden poistumia. (Tilastokeskus, 2021, s. 52) Mikäli näitä päästöjä voitaisiin hillitä voimakkaasti erilaisilla ennallistamiskeinoilla, kuten turvemaiden metsittämällä, voitaisiin nettonielujen määrää kasvattaa ja jopa kaksinkertaistaa vuoteen 2035 mennessä. Tällöin päästövähennysten määrä voisi olla esimerkiksi 10 Mt, jos lähes kaikista päästöistä päästäisiin eroon. Kuitenkin esimerkiksi viljelysmaillakin on päästöjä, joihin kuitenkin voidaan vaikuttaa erilaisilla keinoilla, joita tutkitaan RATKU-nimisessä projektissa. Jotta tarkkoja laskelmia voitaisiin tehdä TURNEE -tutkimuksen perusteella, tarvitaan vielä lisää tietoja ja tarkennuksia. Kuten muutaman muunkin tutkimuksen, tämänkin tutkimuksen kohdalla hiilikädenjälkimahdollisuutta voidaan tarkastella jatkossa uudelleen, jos teknologiaa saadaan kehitettyä lisää ja sen käyttöpotentiaalia pystyttäisiin arvioimaan tarkemmin.

Turvemaiden maankäyttöön ja niiden ympäristövaikutuksiin liittyvässä RATKU-projektissa etsitään ratkaisuja turvemaiden eri maankäyttömuotojen ympäristövaikutusten vähentämiseen. Projektissa tutkitaan eri kasvilajeja sekä maankäyttömuotoja ja tutkimuksessa onkin tarkastelussa metsäoitettu turvemaa, viljelty turvemaa, viljelyn päätyttyä soistuva ja metsittyvä turvepelto sekä luonnontilassa oleva suo. (Liimatainen, 2021) Lisäksi tarkastellaan kasvihuonekaasupäästöjä ja vedenlaatua sekä vesistöpäästöjä ja happamia sulfaattimaita sekä näiden vaikutusta. Tämänkin tutkimuksen TRL- taso sijoittuu viiden kohdille, sillä tasoon vaikuttavat samat tekijät kuin TURNEE-projektissa. Mukana tutkimuksessa ovat esimerkiksi LUKE, Naturcom sekä Boreal kasvintuotanto. Suomesta jopa kolmasosa on turvemaata, joten tutkimustuloksilla voisi olla merkittäviä mahdollisuuksia tulevaisuudessa. (Liite 5.)

Luonnonvarakeskus on arvioinut, että viljelykäytäntöjä muuttamalla voitaisiin saavuttaa jopa 0,91 Mt CO<sub>2</sub>-ekv. päästövähennykset. Tämä vaatisi sen, että viljellyillä pelloilla turpeen hiilivarasto säilyisi. Suomessa turvemaapelloja on noin kymmenesosa kokonaisviljelyalasta ja tämän päästövähennystavoitteen saavuttaminen vaatisi muutoksia noin 15 % turvemaapelloissa. Viljelykeinojen muuttaminen liittyisi esimerkiksi viljelykasvien vaihtamiseen yksivuotisista monivuotisiin, nurmi- ja kosteikkoviljelyyn sekä vesienhallintaan. Näillä muutoksilla päästövähennykset olisi saavutettavissa melko nopealla aikataululla. (Luonnonvarakeskus, 2021b) RATKU-projektissa tutkitaan juurikin kasvilajien vaikutusta ja sitä, voidaanko turvemaita käyttää viljelykäyttöön, joten sen päästövähennyspotentiaalia voidaan pohtia Luonnonvarakeskuksen tekemien arvioiden pohjalta. Tutkimuksella voisi olla siis noin 0,91 Mt CO<sub>2</sub>-ekv. päästövähennysmahdollisuus ja se voisi kasvattaa yliopiston hiilikädenjälkeä saman verran.

TurveSopu-tutkimuksessa keskitytään puolestaan turvemaiden vesien hallintaan, ravinnekuormituksen ja valunnan määrää tarkkailemalla. Tutkimuksessa halutaan selvittää voidaanko valuntavesiä hallita yhdessä maa- ja metsätalouden osalta sekä sitä, voidaanko valuntavesiä varastoida kasvukaudelle turvemaiden ja happamien sulfaattimaiden vesitalouden hallintaan. Tutkimusta tehdään Ruukissa tutkimuskenttäympäristössä, jossa tilanteita ja toimivuutta voidaan testata. (Luonnonvarakeskus, 2021c) Tarkoituksena on keskittyä juuri Pohjois-Suomen alueelle ja hankkia tarkempaa tietoa alueen soista niin, että pohjavedenpinta saataisiin pysymään tasaisena. Hankkeessa halutaan myös selvittää kustannusten määrä. Mukana tutkimushankkeessa on Luonnonvarakeskus. (Liite 5.) TRL-taso on viiden luokkaa, koska tutkimus on demonstraatio asteella kokeellisessa ympäristössä. Tämän tutkimuksen kohdalta on vaikea arvioida numeerisesti päästövähennyksen määrää, minkä lisäksi tutkimus keskittyy enemmän vesistöihin ja siihen, miten vesistöt vaikuttavat turvetuotantoalueilta lähteviin päästöihin. Näin ollen tutkimukselle ei voida määrittää tarkkaa päästövähennystä eikä sitä näin ollen voida laskea suoraan mukaan yliopiston tämän hetkiseen hiilikädenjälkeen.

VÄPÄ-tutkimushankkeessa on tarkoitus tukea viljelijöitä ja selvittää, millaisilla viljelytekniikoilla viljelymaiden kasvihuonekaasupäästöjä voisi pienentää. Nurmiviljelyllä voidaan vähentää peltoviljelystä aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä sekä kasvattaa peltojen hiilivarastoja. Hankkeessa pyritään kehittämään nurmiviljelyä

vähäpäästöisemmäksi jo hyväksi koetuilla menetelmillä ja saada aikaan tietopankki, jotta melko hajallaan olevat tutkimustiedot saataisiin käyttäjäystävälliseen muotoon. (Luonnonvarakeskus, 2021d) Mukana tutkimuksessa ovat muun muassa LUKE, ProAgria Oulu, Valio, Osuuskunta Pohjolan maito sekä viljelijät. (Liite 5.) Tutkimuksessa kerätään siis yhteen lähinnä jo tehtyä tutkimustyötä, joten varsinaisesta hiilikädenjäljestä ei voida suoraan puhua, koska päästövähennykset saavutettaisiin enimmäkseen jo olemassa olevilla ratkaisuilla.

## 8. HIILIKÄDENJÄLKILASKENNAN LOPPUTULOKSET

Kuten tutkimusten kohdalla on tullut ilmi, hiilikädenjälkeä on lähes mahdoton laskea tarkasti yliopiston tutkimustyölle. Toisin kuin hiilijalanjälkeä, on hiilikädenjälkeä myös vaikea laskea vuositasolla, sillä mahdolliset päästövähennykset toteutuisivat vasta tulevaisuudessa. Hiilikädenjälkilaskennan tuloksena saadaankin ennemmin päästövähennyspotentiaali, jota yliopiston tutkimus tarjoaa tulevaisuudessa. Useat tutkimukset ovat vielä kehitysasteella, eikä täysin hyödynnettävissä yrityksien ja teollisuuden mittakaavassa. TRL-taso ja sen muuttuminen sekä tulosten saattaminen todelliseen käyttöön esimerkiksi yrityksille vaatii monien tutkimusten tapauksessa vielä useita vuosia.

Yliopiston tutkimustyö kuitenkin nopeuttaa tulosten aikaansaamista sekä niiden hyödyntämistä jatkossa. Tutkijoiden haastatteluissa kävi ilmi, että yliopiston ansiosta jotkin tulokset ja konkreettiset muutokset voitaisiin saattaa yritysten käyttöön esimerkiksi 5-10 vuotta aiemmin, verrattuna tilanteeseen, ettei Oulun Yliopisto olisi mukana tutkimuksissa. Tutkimuksilla onkin merkittävä roolihiilineutraaliustavoitteen kannalta, sillä Suomen tavoite on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Tämä tarkoittaa, että päästövähennyksiä tulisi saavuttaa merkittävästi jo reilussa kymmenessä vuodessa ja juuri nyt tarvitaan hiilineutraaliutta tukevaa tutkimustyötä.

Hiilikädenjälkilaskennassa verrataan esimerkiksi uutta tekniikkaa vanhaan tekniikkaan, jolloin voidaan laskea joitakin arvoja sille, kuinka paljon hiilidioksidipäästöt vähenevät uudemmalla ja ympäristöystävällisemmällä prosessilla. Aika asettaa kuitenkin haasteita hiilikädenjäljen arvon määrittelylle, sillä laskelmat voivat muuttua huomattavasti ajan kuluessa. Tämä asettaa haasteita sille, että hiilikädenjäljelle saataisiin jokin valmis laskentakaava, joka olisi hyödynnettävissä yhtä laajasti kuin hiilijalanjälki tällä hetkellä. Teknologian kehittyessä ja siirtyessä esimerkiksi yritykselle, se ei enää kerrytä hiilikädenjälkeä yliopistolle. Kun teknologiasta saavuttaa valta-asemaa markkinoilla ja se tulee yleiseen käyttöön, ei se kerrytä enää yrityksenkään hiilikädenjälkeä. Voidaan ajatella, että viimeistään vuonna 2050 uusien teknologioiden tulisi olla valta-asemassa markkinoilla, jolloin nämä vähähiilisyyttä tavoittelevat teknologiset ratkaisut eivät kasvata hiilikädenjälkeä ollenkaan luodessaan uuden perustan käytössä olevalle teknologialle.



### **8.1. Tutkimustyön hiilikädenjälki Oulun Yliopistossa**

Kun edellisessä luvussa esiteltyjen tutkimusprojektien päästövähennyspotentiaalit lasketaan yhteen, saadaan hiilikädenjäljen arvioiduksi lukemaksi 6,70160666 miljoonaa tonnia hiilidioksidia. Tämä noin 6,7 miljoonan tonnin hiilikädenjälki on merkittävä, kun sitä verrataan Suomen kokonaispäästöihin, jotka olivat vuonna 2020 noin 48,3 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub>-ekv. Laskelmat havainnollistavat hyvin sen, kuinka suuri merkitys yliopistoilla ja tutkimustuloksia tuottavilla tahoilla on ilmastonmuutoksen hillinnässä ja päästövähennyksiä tavoitellessa.

Taulukkoon 3 on yhteenvetona koottu ne projektit, joiden päästövähennysmahdollisuudet voidaan tässä vaiheessa laskea mukaan Oulun Yliopiston hiilikädenjälkeen. Kuten useasti on mainittu, lukemat eivät ole absoluuttisia, ja niihin liittyy paljon epävarmuuksia. Hiilikädenjälki voi siis tulla vielä muuttumaan ja sellaiset projektit, jotka ovat tällä hetkellä jääneet ulkopuolelle laskennasta, voivat kehittyessään kuulua mukaan. Jokaisella tutkimuksella, joita tässä työssä on käsitelty, on tärkeä asema tutkimustyössä, eikä niiden arvo määräydy sen mukaan, päätyvätkö ne tämän hetkiseen hiilikädenjälkilaskentaan.

Taulukko 3. Hiilikädenjälkeen laskettavat projektit ja niiden potentiaalinen päästövähennys

| Projekti   | Potentiaalinen päästövähennys                    |
|--|--|
| FFS  | 4 Mt yhteensä                                    |
| TOCANEM  |  |
| AMET   | 0,2 Mt   |
| TOCANEM (Kuitu- ja partikkelitekniiikan tutkimusyksikkö) | CSAB: 120 kt + Kuonien geopolymerisaatio: 160 kt |
| MIMEPRO  | 302 kt   |
| ARCTIC-ecocrete  | 20 kt  |
| DeCONCRETE   | 23,7 kt  |
| SULTAN   | 92 kt  |
| GEOMINS  | 92 kt  |
| Wool2loop  | 10 kt  |
| FLOW   | 165 kt   |
| BIOSIM   | 2,16 t   |
| HOPE   | 345 kt   |
| MAJAKKA  | 251,2 kt   |
| OXILATE  | 1,3 kt   |
| RATKU  | 0,91 Mt  |
| Making city  | 4,5 t  |
| EVISA  | 4,3 kt   |
| SINNI  | 5 kt   |
| <b>YHT. 6 701606,66 tonnia ≈ 6,7 Mt</b>                  |  |

Taulukosta 3 löytyvien projektien lisäksi mukana tarkastelussa on ollut useita projekteja, joita ei kuitenkaan ole sisällytetty tähän työhön ja lopulliseen hiilikädenjälkilaskentaan. Useimmissa tapauksissa syynä on ollut se, ettei tutkimusten päästövähennysmahdollisuutta ole pystytty arvioimaan siten, että tuloksena olisi ollut jokin suhteellisen tarkka lukema. Joidenkin projektien kohdalla mahdolliset päästövähennykset ovat myös epäsuoria, jolloin niiden tarkka arvioiminen on hankalaa, mutta projektit ovat silti tärkeitä ilmastonmuutoksen hillinnässä, sillä ne voivat

mahdollistaa myöhemmin päästövähennyksien toteutumisen jonkin yrityksen tai toisen tutkimuksen kautta.

Prosessimetallurgian tutkimusyksikössä oli käynnissä projekteja, joiden kohdalla päästövähennysarvioita pystyttiin tekemään. Mukana oli kuitenkin myös projekteja, joiden kohdalla arvioita ei vielä voitu tehdä. Nämä projektit olivat SLAGREUS ja Fines2EAF.

Kuitu- ja partikkelitekniikan tutkimusyksikössä oli myös käynnissä projekteja, joiden päästövähennystä ei pystytty vielä arvioimaan, mutta joilla voi tulevaisuudessa olla hiilikädenjälkeen vaikuttavia mahdollisuuksia. Lisäksi mukana oli kaksi projektia, joilla ei ollut suoria päästövaikutuksia; GeoFUN ja VIKE, jossa mukana oli myös luonnontieteellinen tiedekunta. Muut projektit, joiden päästövähennystä ei voitu arvioida, olivat:

- Sesu
- SelDES; mukana myös Ympäristö- ja kemiantekniikan tutkimusyksikkö
- ARVOPURU
- MinChelator
- W2W

Optoelektroniikan ja mittaustekniikan tutkimusyksikössä oli käynnissä projekteja, joiden päästövähennysmahdollisuudet olivat epäsuoria ja siksi niitä oli vaikea määritellä. Projektit olivat:

- Painettava älykkyys turvallisen ruokaketjun mahdollistajana
- Sustainable solid-state lithium-ion batteries
- Painettavat teknologiat kiinteän elektrolyytin akkusovelluksissa
- Energy and cost efficient production of solar energy under arctic environmental conditions

Arkkitehtuurin tutkimusyksikössä on myös käynnissä kestävä kehityksen mukaisia projekteja, joiden päästövähennykseen liittyvät vaikutukset ovat kuitenkin epäsuoria ja myös vaikeasti arvioitavia. Näitä projekteja oli esimerkiksi:

- IPAWA

- WelLIT
- Log

Päästövähennysten määrää oli vaikea arvioida myös Älykkäät koneet ja järjestelmät - tutkimusyksikössä käynnissä olevien tutkimusten osalta. Näitä projekteja ovat:

- ESKE
- VESIHIISI
- COGNITWIN

Luonnontieteellisen tiedekunnan NMR-tutkimusyksikössä käynnissä olevia projekteja voisi sanoa niin kutsutuiksi enabler -tutkimuksiksi, joiden tutkimustyö ja ratkaisut mahdollistavat muiden projektien onnistumisen. Näillä projekteilla ei itsessään ole päästövähennystavoitetta, mutta ne ovat erittäin tärkeä osa muita projekteja ja niiden päästövähennysten toteutumista. Ilman tämän kaltaisia projekteja ei päästövähennyksiä välttämättä voitaisi saavuttaa ja myös hiilikädenjälkeä kasvattavia projekteja ei saataisi edistettyä. NMR-tutkimusyksikössä käynnissä olevia projekteja ovat:

- Laplace NMR
- Advanced NMR for sustainability
- Edellisiin projekteihin liittyviä aerosolitutkimuksia
- Zero-CO2 cement concept evaluated with novel Nuclear Magnetic Resonance

## **8.2. Hiilikädenjälkilaskentaan liittyvät epävarmuudet**

Laskentaan liittyy epävarmuuksia ja osittain ne johtuvat siitä, että käsitteenä hiilikädenjälki on melko uusi, eikä tämän kaltaista positiivista ilmastomittaria ole käytetty yleisesti niin paljon kuin esimerkiksi hiilijalanjälkeä. Hiilikädenjälkeä on myös käytetty lähinnä yrityksissä ja konkreettisissa tuotteissa tai palveluissa. Hyvä esimerkki tällaisesta on esimerkiksi öljynjalostusyhtiö Neste Oyj, joka on ollut mukana VTT:n ja Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston projektissa, jossa on kehitetty tieteellisen hiilikädenjäljen laskentamenetelmää. Nesteen kohdalla heidän tavoitteensa onkin vähentää asiakkaiden kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 20 miljoonaa tonnia hiilidioksidiekvivalenttia vuoteen 2030 mennessä. Vuonna 2020 he auttoivat asiakkaitansa vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä 10 miljoonaa tonnia. (Neste, 2021)



Tällaisessa tapauksessa hiilikädenjäljelle on helpompi määritellä laskukaava ja yksinkertaistettuna se onkin vanhan tuotteen hiilijalanjäljen ja uuden, ympäristöystävällisemmän tuotteen, hiilijalanjäljen erotus.

Tutkimustyössä hiilikädenjälkeä on kuitenkin vaikea määritellä näin suoraviivaisesti, sillä lopulliseen arvoon vaikuttavat monet asiat. Tutkimustyö ei itsessään vähennä minkään konkreettisen tuotteen hiilijalanjälkeä, vaan sillä lähtökohtaisesti koitetaan löytää keinoja ympäristöystävällisempien materiaalien, prosessien tai tuotteiden kehittelyyn. Tässä korostuu myös se, ettei hiilikädenjälkeä voi verrata yliopiston aiheuttamaan hiilijalanjälkeen, vaan ne ovat täysin erilliset käsitteet. Hiilikädenjäljen voi ajatella muodostuvan vasta siinä vaiheessa, kun jokin taho, esimerkiksi yritys, pystyy omassa toiminnassaan hyödyntämään yliopiston tutkimustuloksia. Tällöin yliopisto on pystynyt tarjoamaan yritykselle ikään kuin palveluna ratkaisuja, joiden avulla yritys pystyy pienentämään omaa hiilijalanjälkeään ja näin ollen yliopiston hiilikädenjälki kasvaa.

Yksi keino, jolla nimenomaan tutkimustyön hiilikädenjälkeä voisi määritellä tarkemmin ja erottaa yrityksen hiilikädenjäljestä, voisi olla Bernon et al. käyttämä, jo aiemmin esitelty termi: hiiliaivojälki, Carbon brainprint. Heidän tutkimuksessaan on ollut tarkoitus kehittää menetelmiä, joilla voitaisiin paremmin arvioida yliopistojen osuutta kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Tutkimusta toteutettiin melko samankaltaisilla tavoilla kuin tätäkin tutkimusta. Siinä keskityttiin muutamiin tutkimusprojekteihin, joilla voisi olla päästövähennysmahdollisuuksia ja niiden pohjalta laskettiin mahdollinen hiiliaivojälki yliopiston tutkimustyölle. Tutkimuksessa nousi esiin myös samanlaisia epäkohtia, jotka vaatisivat vielä jatkokehittelyä ja ratkaisuja. Hiiliaivojälki voisi toimia esimerkiksi yliopistojen väliseen vertailuun, mutta se ei ole täysin aukoton, kun pohditaan muiden tahojen työpanosta tutkimuksessa. (Bernon et al., 2015)

Yksi epävarmuutta lisäävä tekijä tutkimuksessa oli myös se, miten määritellään tutkimukseen osallistuneiden tahojen osuudet hiilikädenjäljestä. Bernon et al. mukaan tätä voitaisiin tarkastella esimerkiksi budjettien kautta, mikäli osallistuneet tahot ovat tuottaneet samantyyllisiä tuloksia. Jos tutkimukseen on osallistunut useampi yliopisto, on niiden työpanos todennäköisesti melko samanlaista, jolloin määrittelyä voidaan tehdä budjettiosuuksien tai projektiroolien mukaan. Haasteita kuitenkin aiheuttaa erilaiset roolit

ja toimijat, joiden työpanos tutkimuksessa eroaa merkittävästi toisista. Yksi näkökulma tutkimuksessa oli myös, että päästövähennyksiin ei oltaisi päästy ilman yliopiston panosta, jolloin koko kädenjälki olisi yliopiston saavutus. (Bernon et al., 2015) Tämä kuitenkin aiheuttaa vaaran siitä, että samoja laskelmia tehdään useasti eri tahoilta, eli esimerkiksi kaksi yliopistoa laskisi itselleen saman hiiliaivojäljen, vaikka projekti olisi ollut yhteinen ja päästövähennysmahdollisuuden määrä ei tuplaannu.

Tässä työssä ei käsitelty yliopiston osuutta tutkimuksissa esimerkiksi budjettien muodossa, mutta tämä mahdollisuus on huomioitava jatkossa, kun hiilikädenjälkilaskentaa, tai hiiliaivojäljen laskentaa, kehitetään. Ajatus siitä, että ilman Oulun Yliopiston osuutta ja tutkimuspanosta mikään tässä työssä käsitellyistä tutkimuksista ei voisi saavuttaa päästövähennyksiä, pitää paikkaansa ja tekee jokaisesta tutkimuksesta ja tutkijoiden työstä tärkeän. Osuuksia tulisi kuitenkin jatkossa pohtia, sillä niin kutsutun kaksoislaskennan mahdollisuus on olemassa, jos jokaiset tutkimukseen osallistuneet tahot laskevat koko saavutetun hiilikädenjäljen itselleen. Samojen päästövähennysten tai hiilikädenjälkeen tähtäävien tutkimusten moninkertainen laskenta on ongelmallista ja sitä tulisi välttää.

Lisäksi ajan merkitys ja teknologianvalmiustaso, eli TRL, aiheuttavat haasteita hiilikädenjäljen määrittelylle. Tässä työssä pohjana on pidetty teknologian elinkaarta, jonka pituus olisi noin 30 vuotta, eli tässä ajassa kehitettäisiin täysin uusi teknologia, joka kehittyessään pääsee markkinoille, saavuttaa valta-aseman ja lopulta väistyy uuden teknologian tieltä. Tämän pohjalta on myös määritelty, että tutkimuksissa kehitettävät teknologiat etenisivät TRL-asteikolla seuraavalle asteelle noin kolmessa vuodessa, mikä ei todellisuudessa kuitenkaan mene aina näin. Joskus tutkittavat teknologiat voivat edetä tasolta toiselle hyvinkin nopeasti jo esimerkiksi muutaman vuoden sisällä. Tämän takia on vaikea määrittää tarkasti, milloin teknologia on tarpeeksi valmis markkinoille ja milloin yritys voi ottaa sen käyttöönsä, jotta se kasvattaisi yliopiston hiilikädenjälkeä.

Toinen tähän liittyvä ongelma on se, että siinä vaiheessa kun yritys hyödyntää tutkimustulosta esimerkiksi tuotteen valmistuksessa, se kasvattaa yliopiston hiilikädenjälkeä. Kun yritys alkaa puolestaan myymään tuotettaan asiakkailleen, se pystyy kasvattamaan omaa hiilikädenjälkeään, jos asiakas voi pienentää omaa hiilijalanjälkeään tuotteen avulla. Tässä tilanteessa on huomioitava, ettei sekä yliopisto että yritys voi laskea hiilikädenjälkeä samanaikaisesti itselleen, vaan kädenjälki on ikään

kuin siirtynyt yrityksen positiiviseksi ilmastovaikutukseksi. Lopulta, kun tuote ja sen teknologia saavuttaa valta-aseman markkinoilla niin, että useat yritykset valmistavat ja myyvät niitä, ei kyseinen teknologia enää kasvata kenenkään hiilikädenjälkeä. Nämä uudet, ympäristöystävällisemmät tuotteet määrittävät silloin niin kutsutun perustason, johon uusia teknologioita tullaan vertaamaan.

Tutkimusten tarjoamiin päästövähennyksiin olisi päästävä, jotta Suomi voisi saavuttaa oman hiilineutraaliustavoitteen. Sitä tarkasteltaessa monet Oulun Yliopistolla käynnissä olevista tutkimuksista tukevat tätä tavoitetta, mikäli tutkimustulokset olisivat hyödynnettävissä tuolloin. Mikäli tutkimustuloksia voidaan hyödyntää, voidaan Suomesta tällöin tarjota vähähiilisyyteen auttavia ratkaisuja niihin maihin, joissa hiilineutraaliustavoitetta ei olla vielä saavutettu ja uusia teknologioita tarvitaan. Tutkimustyön merkittävyys korostuu siis myös tässä suhteessa, kun jokainen maa kamppailee globaalin ongelman, ilmastonmuutoksen, kanssa.

Kuten aiemmin jo mainittiin hiilikädenjäljen kohdalla on tärkeää huomioida myös se, ettei positiiviset ilmastovaikutukset ole suoraan verrannollisia negatiivisiin vaikutuksiin, kuten päästöjen syntymiseen. Hiilijalanjälkeä ja hiilikädenjälkeä ei voida verrata niin, että saavutettu hiilikädenjälki pienentäisi syntyneiden päästöjen ja ilmastohaittojen määrää suoraan. Yrityksen tai organisaation on kiinnitettävä erityistä huomiota tuottamiinsa haitallisiin ilmastovaikutuksiin ja pyrkiä pienentämään hiilijalanjälkeään mahdollisimman paljon. Hiilikädenjäljen kasvattaminen ei näitä omasta toiminnasta syntyneitä päästöjä suoraan vähennä vaan hiilikädenjälki toimii omana mittarina, joka mittaa kaikkia niitä hyviä ilmastotekoja, joita yritys tai organisaatio omalla toiminnallaan voi saada aikaan.

### **8.3. Jatkoehdotuksia tutkimustyön hiilikädenjälkilaskentaan**

Hiilikädenjälki ja sen suuruus Oulun Yliopiston tutkimustyössä on siis vain arvio ja sen tarkentaminen vaatii jatkotyöskentelyä. Tutkimusprojektien osalta tulokset tarkentuvat, jolloin myös tarkempia laskelmia päästövähennyksistä on helpompi tehdä. Tutkimusten edetessä on myös helpompi arvioida aikataulua, jolloin päästövähennykset olisi mahdollista saavuttaa. Hiilikädenjälkilaskentaa olisi hyvä tarkastella esimerkiksi vuosittain, jolloin saataisiin selville, millainen tilanne tutkimusprojektien kannalta on. Jatkossa tutkijoita voidaan myös kannustaa arvioimaan omien tutkimusprojektien



hiilikädenjälkimahdollisuutta, mikä voisi tuoda lisänäkyvyyttä ja -arvoa tutkimusprojekteille. Lisäksi valmiiksi arvioidut hiilikädenjäljet helpottaisivat seurantaa, jonka avulla nähtäisiin, miten päästövähennystavoitteet ovat toteutuneet ja miten arviot hiilikädenjäljen määrästä ovat muuttuneet. Myös päästövähennysten toteutumista on hyvä seurata, sillä mitä aikaisemmin päästövähennyksiä voidaan saavuttaa, sitä paremmin myös ilmastonmuutosta voidaan hillitä ja vaikutuksia vähentää. Mikäli ilmasto lämpenee liikaa, kasvavat vaikutukset merkittävästi, eikä kaikkia niitä voida enää ehkäistä.

Jatkossa tärkeää on keskittyä laskentamenetelmiin ja siihen, ettei jokaisen tutkittavan teknologian kohdalla tehdä moninkertaisia laskelmia vain sen vuoksi, että tulokset näyttäisivät hyvältä. Tulevaisuudessa olisikin hyvä määrittää se, miten jokaisen tutkimukseen osallistuvan tahon osuudet saavutettavista hiilikädenjäljistä voitaisiin selvittää. Tämän avulla voidaan pienentää kaksoislaskennan riskiä. Huomioimalla tutkimukseen osallistuneiden tahojen osuudet, voidaan välttää se, ettei samoja päästövähennysmahdollisuuksia ja laskelmia tehdä useaan kertaan. Moninkertaiset laskelmat aiheuttavat sen vaaran, että positiivisia ilmastovaikutuksia on laskelmien mukaan paljon enemmän kuin niitä todellisuudessa saadaan aikaan.

Yleisenä huomiona voidaan pitää sitä, että hiilikädenjäljen laskenta ei toimi samalla tavalla konkreettisille tuotteille kuin yliopistojen tarjoamalle tutkimustyölle, joten jonkinlainen lisämäärittely tähän olisi tarpeen. Aivohiilijäljen kaltaisella termillä voitaisiin kuvata juuri päästövähennyksiin tähtäävien tutkimusten ja niihin liittyvän työn positiivisia ilmastovaikutuksia, jota yliopistot omalla tutkimustyöllään voivat lisätä. Lisämäärittelyjen ansiosta myös vertailu yliopistojen ja muiden tutkimustyötä tekevien tahojen välillä helpottuisi. Tutkimustyön merkitys on erittäin tärkeässä roolissa hiilijalanjälkeä pienentävien teknologioiden kehittämisessä ja siksi sille olisi hyvä kehittää selkeämpi laskentatapa, jolloin lukema olisi tarkempi ja sen esittäminen myös ulkopuolisille olisi selkeämpää. Käsitteenä hiilikädenjälki ei sellaisenaan vielä kata kaikkia ongelmakohtia etenkin selvitetäessä tutkimustyön vaikutusta päästövähennyksiin, mikä johtaa epätäydelliseen laskelmaan hiilikädenjäljen osalta.



## YHTEENVETO

Ilmastonmuutos ajaa tänä päivänä jokaisen yrityksen, organisaation, toimijan ja yksittäisen ihmisen miettimään omia valintojaan. Ilmastonmuutoksen hillintä ja lämpenemisen estäminen vaativat merkittäviä ja kiireellisiä tekoja, sillä mitä enemmän ilmasto lämpenee, sitä enemmän peruuttamattomia muutoksia ehtii tapahtua. Hillintä vaatii yhteistyötä eri tahojen ja maiden välillä, jotta lämpeneminen saataisiin pysähtymään ja hiilidioksidipäästöt vähenemään.

Hiilijalanjäljellä kuvataan esimerkiksi organisaation tai tuotteen negatiivisia ilmastovaikutuksia. Näiden vaikutusten vähentäminen on tärkeää ja kestävä kehitys ohjaakin lähes jokaisen yrityksen toimintaa erittäin merkittävästi. Rinnalle on tuotu uusi, positiivisia vaikutuksia kuvastava termi: hiilikädenjälki. Sen avulla esimerkiksi yritys voi esitellä aikaansaamiaan positiivisia vaikutuksia. Omilla tuotteillaan, ratkaisulla tai palveluilla yritys voi auttaa asiakkaitaan pienentämään omaa hiilijalanjälkeään ja näin ollen kasvattaa ratkaisuja tarjoavan yrityksen hiilikädenjälkeä.

Oulun Yliopisto on vuoden 2021 aikana selvittänyt oman toimintansa aiheuttamaa hiilijalanjälkeä, mutta rinnalle on haluttu nostaa myös tutkimustyöllä aikaansaavat positiiviset ilmastovaikutukset. Tutkimustyön ja sen avulla saatavien tulosten ansiosta yliopistoilla onkin erittäin suuri mahdollisuus vaikuttaa ilmastonmuutoksen hillintään. Tarjoamalla tutkimustyönsä ratkaisuja esimerkiksi yritysten käyttöön, yliopistot pystyvät kasvattamaan omaa hiilikädenjälkeään ja olemaan osa vastuullista toimintaa ja ilmastonmuutoksen hillintää.

Hiilikädenjälki on terminä melko uusi ja sen laskemiselle ei ole jokaiseen tilanteeseen pätevää määrittelyä. Tutkimustyöhön liittyvää hiilikädenjälkilaskentaa ei ole juurikaan tehty ja Oulun Yliopisto haluaakin toimia roolimallina ja tiennäyttäjänä tässä asiassa. Laskenta aloitettiin niistä tiedekunnista ja tutkimusyksiköistä, joilla ajateltiin olevan päästövähennyksiin tähtäävää tutkimusta. Mukana oli yhteensä 16 tutkimusyksikköä niin teknillisestä, luonnontieteellisestä kuin tieto- ja sähkötekniikan tiedekunnasta. Lopulliseen laskelmaan otettiin mukaan tutkimusprojektit, joille pystyttiin määrittämään konkreettisia päästövähennykseen tähtääviä lukemia. Tutkimukset olivat myös tarpeeksi pitkällä teknologian valmiustason osalta, mutta ei kuitenkaan niin pitkällä, etteivät ne enää kasvattaisi yliopiston hiilikädenjälkeä.

Laskentahetkellä hiilikädenjäljen arvoksi saatiin noin 6,7 Mt, joka kuvastaa sitä määrää hiilidioksidia, jonka syntymisen tutkimustulokset voisivat tulevaisuudessa ehkäistä. Lukema on merkittävä, sillä esimerkiksi vuonna 2020 päästöt olivat noin 48,3 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub>-ekv. Suurin osa tutkimusten päästövähennystavoitteista olisi määrä tapahtua vuosien 2035-2040 kohdalla, mikä tukee Suomen hiilineutraaliustavoitteita. Tämän jälkeen Suomessa olisi hiilineutraaliutta tukevaa osaamista, jota voisi tarjota maailmalle ilmastomuutoksen hillintään.

Lopulliseen hiilikädenjälkilaskelmaan liittyy kuitenkin epävarmuuksia, joten sen toteutumista on seurattava jatkossa. Tutkimusten edetessä niiden päästövähennysmahdollisuudet ja toteutumisajankohta tarkentuvat. Mukaan laskelmaan voi tulla uusia projekteja, jotka kasvattavat hiilikädenjälkeä. Tavoitteena onkin, että hiilikädenjälkilaskentaa päivitetäisiin jatkossa niin, että Oulun Yliopisto voisi tarjota mahdollisimman tarkan arvion oman tutkimustyönsä positiivisista ilmastovaikutuksista. Lisäksi hiilikädenjälkitermin yleistyessä sen arviointi tutkimusprojekteja suunnitellessa voisi tuoda lisäarvoa ja näkyvyyttä niille tutkimusprojekteille, jotka ottavat hiilikädenjälkimahdollisuuden huomioon.

## LÄHDELUETTELO

Aakkula J., Haakana M., Hirvelä H., Honkatukia J., Kilpeläinen H., Koljonen T., Kärkkäinen L., Laitila J., Lehtonen H., Maanavilja L., Ollilla P., Siikavirta H., Soimakallio S. & Tuomainen T., 2020. Hiilineutraali Suomi 2035 – Skenaariot ja vaikutusarviot [verkkodokumentti]. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 148 s. ISSN 2242-122X. Saatavissa:

<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2020/T366.pdf> [viitattu 12.4.2021]

Aaltola P. & Ollikainen M., 2011. Ilmastomuutos ja talous: hillinnän ja sopeutumisen ekonomiaa ja politiikkaa. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press, Ilmastomuutos käytännössä – hillinnän ja sopeutumisen keinoja, 415 s. ISBN: 978-952-495-178-4 [viitattu 11.11.2021]

Ahlfors M., Heino A., Jonsson H., Klimscgeffskij M., Laine A., Lehtomäki J., Pokela P. & Raivio T., 2020. Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 – Osa 2. [verkkodokumentti] Helsinki: Gaia Consulting Oy. 83 s. Saatavissa: [https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys/rt-raportti-2\\_vahahiilisyys\\_lopullinen.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys/rt-raportti-2_vahahiilisyys_lopullinen.pdf) [viitattu 11.11.2021]

Alvarenga R.A.F., Cooreman-Algoed M., Dewulf J., Huysveld S., Préat N., Sanjuan-Delmás D., Sfez S. & Taelman S.E., 2020. A framework for using the handprint concept in attributional life cycle (sustainability) assessment [verkkodokumentti]. Journal of Cleaner Production, Volume 265. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121743> [viitattu 10.11.2021]

Andrew R., 2020. It's getting harder and harder to limit ourselves to 2°C [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://folk.universitetetioslo.no/roberan/t/global\\_mitigation\\_curves.shtml](https://folk.universitetetioslo.no/roberan/t/global_mitigation_curves.shtml) [viitattu 9.11.2021]

Armila N., Bröckl M., Heads S., Kiuru H., Kämäräinen K., Luoma-aho K., Patronen J., Semkin N. & Sipilä E. 2021. Jätteenpolton kiertotalous- ja ilmastovaikutuksiin vaikuttaminen eri ohjauskeinoin [verkkodokumentti]. Valtioneuvoston kanslia, Helsinki,

164

s.

Saatavissa:

[https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162690/VNTEAS\\_2021\\_08.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162690/VNTEAS_2021_08.pdf?sequence=4&isAllowed=y) [viitattu 21.9.2021]

Auvinen K., Berninger K., Björklund M., Ekholm T., Ekroos A., Hildén M., Huttunen S., Hyytiäinen K., Kokko K., Lähteenmäki-Uutela A., Mehling M., Perrels A., Seppälä J., Soimakallio S., Tikkakoski P., Toivonen E., Tynkkynen O., 2021. Mahdollisuudet vahvistaa ilmastolakia uusilla keinoilla [verkkodokumentti]. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:5. Helsinki. Valtioneuvoston kanslia. ISBN PDF 978-952-383-045-5. 211 s. Saatavissa:

[https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162673/VNTEAS\\_2021\\_5.pdf?sequence=7&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162673/VNTEAS_2021_5.pdf?sequence=7&isAllowed=y) [viitattu 20.10.2021]

Bannerman M., Galvez-Martos J. & Hanein T., 2017. Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production [verkkodokumentti]. Journal of Cleaner Production, Volume 172, Pages 2278-2287. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617328561> [viitattu 11.11.2021]

Barrow M., Buckley B., Caldicott T., Cumberlege T., Hsu J., Kaufman S., Ramm K., Rich D. & Temple-Smith W., 2013. Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions (version 1.0) [verkkodokumentti]. World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. 182 s. Saatavissa: [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Scope3\\_Calculation\\_Guidance\\_0.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Scope3_Calculation_Guidance_0.pdf) [viitattu 21.10.2021]

Behm K., Grönman K., Hohenthal C., Kasurinen H., Leino M., Pajula T., Pihkola H., Sillman J., Soukka R. & Vatanen S., 2018. The Carbon Handprint approach to assessing and communicating the positive climate impact of products – Final Report of the Carbon Handprint project [verkkodokumentti]. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 74 s. ISBN 978-951-38-8679-0. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2018/T346.pdf> [viitattu 19.3.2021]



Behm K., Husgafvel R., Hohenthal C., Pihkola H. & Vatanen S., 2016. Carbon handprint – communicating the good we do [verkkodokumentti]. Espoo: Finnish Innovation Fund Sitra & VTT, 26 s. Saatavissa: [https://media.sitra.fi/julkaisut/Muut/Carbon\\_handprint.pdf](https://media.sitra.fi/julkaisut/Muut/Carbon_handprint.pdf) [viitattu 30.9.2021]

Behm K., Grönman K., Kasurinen L., Lakanen L., Pajula T., Soukka R. & Vatanen S., 2021. Carbon handprint guide – V. 2.0 Applicable for environmental handprint [verkkodokumentti] VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. 29 s. Saatavissa: [https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2021/Carbon\\_handprint\\_guide\\_2021.pdf](https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2021/Carbon_handprint_guide_2021.pdf) [viitattu 20.10.2021]

Berninger K., 2012. Hiilineutraali Suomi – Miten luodaan ympäristöystävällinen yhteiskunta?. Gaudeamus Oy, Helsinki, 182 s. ISBN 978-952-495-247-7. [viitattu 22.9.2021]

Bernon M., Brennan F., Chatterton J., Clements-Croome D., Darby H., Davies G., Elmualim A., Ishiyama E., Kolios A., Longhurst P., Nicholls J., Palmer A., Parsons D., Wilson I. & Yearley T., 2015. Carbon brainprint – An estimate of the intellectual contribution of research institutions to reducing greenhouse gas emissions [verkkodokumentti] Process Safety and Environmental Protection, Volume 96, s. 74-81. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.04.008> [viitattu 9.11.2021]

Bhatia P., Brown A., Cummis C., Draucker L., Lahd H. & Rich D., 2011. Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard – Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard [verkkodokumentti]. USA: World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 150 s. Saatavissa: [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard\\_041613\\_2.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2.pdf) [viitattu 22.3.2021]

Bhatia P., Corbier L., Gage P., Oren K., Ranganathan J. & Schmitz S., 2004. The Greenhouse Gas Protocol – A Corporate Accounting and Reporting Standard [verkkodokumentti]. Washington USA: World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 114 s. Saatavissa: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf> [viitattu 26.3.2021]

Bioenergia ry, 2021. Hiilensidonta [verkkodokumentti]. Helsinki: Bioenergia ry. Saatavissa: <https://www.bioenergia.fi/tietopankki/hiilensidonta/> [22.10.2021]

Birgisdottir H., Häkkinen T. & Nibel S., 2021. Definition and methods for the carbon handprint of buildings [verkkodokumentti]. Danish housing and planning authority, Ministry of the Environment Finland, 98 s. Saatavissa: <https://ym.fi/documents/1410903/40549091/Raportti+-+Definition+and+methods+for+the+carbon+handprint+of+buildings.pdf/ed3c5535-c1b8-3beb-7765-ec0ee1f61443/Raportti+-+Definition+and+methods+for+the+carbon+handprint+of+buildings.pdf?t=1617775615867> [viitattu 10.11.2021]

Biemer J., Blackburn N. & Dixon W., 2013. Our Environmental Handprint – The Good We Do [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee.org/pc124152.oulu.fi:9443/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6617312&tag=1> [viitattu 19.3.2021]

Duxon P., Fernández-Jiménez A., Lukey G., Palomo A., Provis J. & Van Deventer J., 2007. Geopolymer Technology: The Current State of the Art [verkkodokumentti]. Journal of Materials Science 42(9):2917-2933. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/profile/Jannie-Van-Deventer/publication/227210051\\_Geopolymer\\_Technology\\_The\\_Current\\_State\\_of\\_the\\_Art/links/0fcfd5109ad19d6008000000/Geopolymer-Technology-The-Current-State-of-the-Art.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jannie-Van-Deventer/publication/227210051_Geopolymer_Technology_The_Current_State_of_the_Art/links/0fcfd5109ad19d6008000000/Geopolymer-Technology-The-Current-State-of-the-Art.pdf) [viitattu 11.11.2021]

Energiatoteellisuus, 2021. Energia-alan vähähiilisyystiekartta [verkkodokumentti]. Helsinki. Saatavissa: [https://energia.fi/files/4946/Energia-alan\\_vahahiilisyystiekartta\\_2020.pdf](https://energia.fi/files/4946/Energia-alan_vahahiilisyystiekartta_2020.pdf) [15.10.2021]

Espo J., Lesonen N. & Pakarinen J., 2019. Kaivosten kokonaisnostosta valtaosa päätty jätteeksi [verkkodokumentti]. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: <https://www.stat.fi/tietotrendit/artikkelit/2019/kaivosten-kokonaisnostosta-valtaosa-paatyy-jatteeksi/> [viitattu 19.5.2021]

European Commission, 2015. Horizon 2020 – Work programme 2014-2014 [verkkodokumentti] Saatavissa:

[https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014\\_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-ga\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-ga_en.pdf) [viitattu 7.4.2021]

Euroopan komissio, 2003. Kioton pöytäkirja [verkkodokumentti]. Bryssel: Euroopan Unioni. Memo/03/154. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/MEMO\\_03\\_154](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/MEMO_03_154) [viitattu 22.11.2021]

Eurostat, 2017. Glossary: Carbon dioxide equivalent [verkkodokumentti] Saatavissa: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon\\_dioxide\\_equivalent](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon_dioxide_equivalent) [viitattu 9.4.2021]

Fabritius T., Hanein T., Illikainen M., Isteri V., Kinoshita H., Ohenoja K. & Tanskanen P., 2019. Production and properties of ferriterich CSAB cement from metallurgical industry residues [verkkodokumentti]. Science of The Total Environment, Volume 712, 136208. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719362047?via%3Dihub> [viitattu 10.11.2021]

Finlex, 2015. Ilmastolaki [verkkodokumentti]. Helsinki. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150609> [viitattu 22.9.2021]

Finnsementti, 2020. Ympäristöraportti 2020 [verkkodokumentti]. Parainen: Finnsementti Oy, s. 29. Saatavissa: [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Finnsementti\\_ymparistoraportti\\_2020.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Finnsementti_ymparistoraportti_2020.pdf) [viitattu 10.11.2021]

Gao, L., Fang, S., Huang L., Ma T., Porter, A.L., Wang, J., Wang, W. & Zhang, X., 2013. Technology life cycle analysis modeling based on patent documents, Technological Forecasting and Social Change 80 (3), 398-407. [27.9.2021]

Goodall C., 2020. What we need to do now – For a zero carbon society. Lontoo: Profile Books Ltd. 215 s. ISBN 978-1788164771 [viitattu 17.11.2021]

Gouy A., Levi P., Mandová H. & Vass T., 2021. Cement [verkkodokumentti]. IEA. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/cement> [viitattu 12.11.2021]

Greenhouse Gas Protocol, 2021. About Us [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://ghgprotocol.org/about-us> [viitattu 22.3.2021]

Grönman K., Kasurinen H., Pajula T., Pihkola S., Soukka R., 2018. Carbon Handprint Guide [verkkodokumentti]. VTT Technical Research Centre of Finland, 26 s. Saatavissa: [https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/22508565/Carbon\\_Handprint\\_Guide.pdf](https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/22508565/Carbon_Handprint_Guide.pdf) [viitattu 17.3.2021]

Göransson L., Johnsson F., Karlsson L., Odenberger M., Rootzén J. & Toktarova A., 2020. Pathways for Low-Carbon Transition of the Steel Industry – A Swedish Case Study [verkkodokumentti]. Gothenburg: Energies 2020, 13(15), Enhancement of Industrial Energy Efficiency and Sustainability. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/15/3840/htm> [viitattu 9.4.2021]

Hargroves K. & Smith M., 2005. Natural Advantage of Nations: Business Opportunities, Innovation and Governance for the 21<sup>st</sup> Century. London: Routledge. [viitattu 27.9.2021]

Heinonsalo J., 2020. Hiiliopas – Katsaus maaperän hiileen ja hiiliviljelyn perusteisiin [verkkodokumentti]. Kaarina. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/311540/BSAG\\_hiiliopas\\_1.\\_painos\\_2020.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/311540/BSAG_hiiliopas_1._painos_2020.pdf?sequence=1) [viitattu 12.5.2021]

Hildén M., Honkatukia J., Koljonen T., Lehtilä A., Rehunen A., Saikku L., Salo M., Savolahti M., Similä L., Soimakallio S., Tuominen P. & Vainio T., 2019. Pitkän aikavälin kokonaispäästökehitys [verkkodokumentti]. Valtioneuvoston kanslia. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161409/24-2019-Pitkan%20aikavalin%20kokonaispaastokehitys.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. 162 s. [viitattu 12.5.2021]

Humphreys K., Mahasenan N. & Smith S., 2003. The Cement Industry and Global Climate Change: Current and Potential Future Cement Industry CO<sub>2</sub> Emissions [verkkodokumentti]. Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference, Pergamon, Pages 995-1000. ISBN 9780080442761. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-008044276-1/50157-4>. [viitattu 10.11.2021]



Ilmatieteen laitos, 2017. Mittaukset kertovat ilmaston muuttuvan [verkkodokumentti].  
ilmasto.fi. Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/60d35ca2-9874-406e-bb9f-608e5b60746d/mittaukset-kertovat-ilmaston-muuttuvan.html> [viitattu 12.5.2021].

Ilmatieteen laitos, 2021. IPCC:n raportti: ihmisten toiminta on aiheuttanut ennennäkemättömän laajoja ja nopeita muutoksia ilmastossamme [verkkodokumentti].  
Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tiedote/3vWBBiEr4enwIPeUVUIxp0> [viitattu 10.9.2021]

Ilmatieteen laitos & Ympäristöministeriö, 2021. Kuudes arviointiraportti [verkkodokumentti].  
Ilmasto-opas.fi. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kuudes-arviointiraportti> [viitattu 13.9.2021]

IPCC, 2021. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [verkkodokumentti] [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. 39 s. Cambridge University Press. In Press.  
Saatavissa: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf) [viitattu 15.9.2021]

Kallonen K., 2019. Hiilineutraali satama 2035 [verkkodokumentti]. Helsinki: Port of Helsinki – Verkkolehti. Saatavissa: <https://www.portofhelsinki.fi/verkkolehti/hiilineutraali-satama-2035> [viitattu 11.11.2021]

Kemianteollisuus ry, 2021. Hiilineutraali kemia [verkkodokumentti] Helsinki. Saatavissa: <https://www.kemianteollisuus.fi/fi/vastuullisuus/hiilineutraalikemia2045/> [13.10.2021]

Kemp I. & Lim J., 2020. Pinch Analysis for Energy and Carbon Footprint Reduction (Third Edition) [verkkodokumentti]. Oxford, Cambridge: Butterworth-Heinemann. 548

s. ISBN: 978-0-08-102536-9. Saatavissa: <https://doi-org.pc124152.oulu.fi:9443/10.1016/C2017-0-01085-6> [viitattu 10.11.2021]

Kikuchi T. & Kuroda Y., 2010. Carbon Dioxide Uptake in Demolished and Crushed Concrete [verkkodokumentti]. Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 9, No. 1, 115-124, Japan Concrete Institute. Saatavissa: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/9/1/9\\_1\\_115/\\_pdf/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/9/1/9_1_115/_pdf/-char/en) [viitattu 25.10.2021]

Kinnunen P., Sreenivasan H., Cheeseman C.R., Illikainen M., 2018. Phase separation in alumina-rich glasses to increase glass reactivity for low-CO<sub>2</sub> alkali-activated cements [verkkodokumentti] Journal of Cleaner Production 213 (2019): 126-133. Saatavissa: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652618338332?token=107691A614F643B1A749AC20FBC7EA320562C338110BDE470350D4A2A4643896EB354299A8EC77F68B803F895992E5B3&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210518130358> [viitattu 19.5.2021]

Kohl J., 2011. Ilmastonmuutoksen sosiaaliset vaikutukset. Teoksessa: Rohweder L. & Virtanen A. (toim.) Ilmastonmuutos käytännössä – hillinnän ja sopeutumisen keinoja. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press, 415 s. ISBN: 978-952-495-178-4 [viitattu 11.10.2021]

Kuittinen M., 2019. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. 54 s. ISBN: 978-952-361-029-3. Saatavissa: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM\\_2019\\_22\\_Rakennuksen\\_vahahiilisyyden\\_arviointimenetelma.pdf](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf) [viitattu 10.11.2021]

Lassila A-P., 2021. Hiilineutraalit yliopistokiinteistöt [verkkodokumentti]. Suomen Yliopistokiinteistöt Oy. Saatavissa: <https://sykoy.fi/blog/2020/05/26/hiilineutraalit-yliopistokiinteistot/> [viitattu 25.3.2021]

Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P. A., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Arneeth, A., Arora, V. K., Barbero, L., Bastos, A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Doney, S. C., Gkritzalis, T., Goll, D. S., Harris, I., Haverd, V., Hoffman, F. M., Hoppema, M., Houghton, R. A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Johannessen, T., Jones, C. D., Kato, E., Keeling, R. F.,

Goldewijk, K. K., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S., Neill, C., Olsen, A., Ono, T., Patra, P., Peregon, A., Peters, W., Peylin, P., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rocher, M., Rödenbeck, C., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sutton, A., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J., Wright, R., Zaehle, S., and Zheng, B., 2018. Global Carbon Budget 2018 [verkkodokumentti] *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 2141–2194. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018> [viitattu 9.11.2021]

Liimatainen M., 2021. Ratkaisuja turvemaiden eri maankäyttömuotojen ympäristövaikutusten vähentämiseen [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.eura2014.fi/rrtiepa/projekti.php?projektikoodi=A76859> [viitattu 11.11.2021]

Lipsanen A. & Soimakallio S., 2021. Keskeiset käsitteet [verkkodokumentti]. [hiilineutraalisuomi.fi](https://www.hiilineutraalisuomi.fi): Suomen ympäristökeskus SYKE. Saatavissa: [https://www.hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Ilmastotyö/Metsä/Keskeiset\\_kasitteet\(60013\)](https://www.hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Ilmastotyö/Metsä/Keskeiset_kasitteet(60013)) [viitattu 12.5.2021]

Luonnonvarakeskus, 2021a. Sompa - Usein kysytyt kysymykset [verkkodokumentti]. Helsinki: Luonnonvarakeskus. Saatavissa: <https://www.luke.fi/sompa/materiaalit/usein-kysytyt-kysymykset/> [viitattu 10.11.2021]

Luonnonvarakeskus, 2021b. Maa- ja metsätalouden sekä koko maankäyttösektorin ilmastotoimenpiteillä on suuret päästövähennysmahdollisuudet [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.luke.fi/uutinen/maa-ja-metsatalouden-seka-koko-maankayttosektorin-ilmastotoimenpiteilla-on-suuret-paastovahennysmahdollisuudet/>

Luonnonvarakeskus, 2021c. Maa- ja metsätalouden turvemaiden vesien yhteishallinta ravinnekuormituksen ja valunnan määrän näkökulmasta 01 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.luke.fi/projektit/turvesopu-01/> [viitattu 17.11.2021]

Luonnonvarakeskus, 2021d. Vähempipäästöiset nurmikierrat turvellidoilla 01 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.luke.fi/projektit/vapa-01/> [viitattu 17.11.2021]

Lötjönen K. & Tikkanen S., 2013. Voimalaitosten tuhka hyötykäyttöön: vanhoille turvesoille kasvatetaan metsää [verkkodokumentti]. Yle. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-6899345> [viitattu 10.11.2021]

Maa- ja metsätalousministeriö, 2014. Kansallinen ilmastonmuutokseen sopeutumis suunnitelma 2022. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://mmm.fi/documents/1410837/5120838/Kansallinen+ilmastonmuutokseen+sopeutumis suunnitelma+2022.pdf/1716aa76-8005-4626-bae0-b91f3b0c6396?t=1501159291000>. 39 s. [viitattu 15.9.2021]

Maa- ja metsätalousministeriö, 2021. Metsät turvemailla – ratkaisuja päästöjen hillintään ja hiilinielujen kasvattamiseen, TURNEE [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://mmm.fi/-/metsat-turvemailla-ratkaisuja-paastojen-hillintaan-ja-hiilinielujen-kasvattamiseen> [viitattu 19.5.2021]

Making City, 2019a. The Making-City Project [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://makingcity.eu/the-project/> [viitattu 10.11.2021]

Making City, 2019b. Objectives & expected impacts [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://makingcity.eu/objectives-expected-impacts/> [viitattu 10.11.2021]

Haanpää S., Mayer M., Manu S., Nurminen M., Siltanen K., Smith C., & Talvitie J., 2020. Ilmastonmuutos ja sosiaali- ja terveyssektori [verkkodokumentti]. SOSTE Suomen Sosiaali ja terveys ry, Helsinki. 82 s. Saatavissa: <https://www.soste.fi/wp-content/uploads/2020/06/SOSTE-julkaisu-2020-Ilmastonmuutos-ja-sosiaali-ja-terveyssektori.pdf> [viitattu 16.9.2021]

Motiva, 2021. CO<sub>2</sub>-päästökertoimet [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto\\_suomessa/co2-paastokertoimet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-paastokertoimet) [viitattu 29.10.2021]

Neste, 2021. Hiilikädenjälki [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.neste.fi/konserni/vastuullisuus/vaikutuksemme-ymparistoon/hiilikadenjalki> [viitattu 17.11.2021]



Norris G., 2015. Handprint-Based NetPositive Assessment [verkkodokumentti]. Boston: Sustainability and Health Initiative for NetPositive Enterprise Center for Health and the Global Environment. 17 s. Saatavissa: [https://hwpi.harvard.edu/files/chge/files/handprint-based\\_netpositive\\_assessment.pdf](https://hwpi.harvard.edu/files/chge/files/handprint-based_netpositive_assessment.pdf) [viitattu 31.3.2021]

Northern (Arctic) Federal University, 2021. DeConcrete – WPs [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://narfu.ru/deconcrete/deconcrete-wps/> [viitattu 19.5.2021]

Oulun Yliopisto, 2018. Arkkitehtuurin yksikkö – Tutkimus [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www oulu.fi/arkkitehtuuri/node/8573> [viitattu 6.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2019. NMR-tutkimusyksikkö – Zero carbon dioxide cement material evaluated with nuclear magnetic resonance [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www oulu.fi/nmr-spektroskopia/node/196875> [viitattu 25.3.2021]

Oulun Yliopisto, 2019a. Majakka – digitalisaation työkalupakista eväät vähähiiliseen teollisuuteen [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www oulu.fi/environmentalengineering/majakka> [viitattu 10.11.2021]

Oulun Yliopisto, 2019b. CEMGLASS [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www oulu.fi/pyokuien/node/193264> [viitattu 11.11.2021]

Oulun Yliopisto, 2020. Materials and mechanical engineering – Machine Design [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www oulu.fi/materialsengineering/machine\\_design](https://www oulu.fi/materialsengineering/machine_design) [viitattu 6.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2020. Materials and mechanical engineering – Novel Stainless Steels [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www oulu.fi/materialsengineering/node/44830> [viitattu 6.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2020a. Vähähiilisempää terästuotantoa valokaariuunilla [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www oulu.fi/yliopisto/uutiset/valokaariuunilla-vahahiilisempaa-terasta> [viitattu 19.5.2021]

Oulun Yliopisto, 2020b. AMET [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/casr/node/198121> [viitattu 11.11.2021]

Oulun Yliopisto, 2020c. Uudessa HOPE-projektissa kehitetään energiajärjestelmiä kokonaisvaltaisesti [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/yliopisto/uutiset/uudessa-hope-projektissa-kehitetaan-energiajarjestelmia-kokonaisvaltaisesti> [viitattu 12.11.2021]

Oulun Yliopisto, 2020d. OXILATE – Operational eXcellence by Integrating Learned information into AcTionableExpertise [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/fi/projektit/oxilate-operational-excellence-integrating-learned-information-actionable-expertise> [viitattu 9.11.2021]

Oulun Yliopisto, 2020e. Energy-wise Port [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/energy/node/209257> [viitattu 17.11.2021]

Oulun Yliopisto, 2020f. Modern villages – Sinnit kylät [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/energy/node/208330> [viitattu 17.11.2021]

Oulun Yliopisto, 2020g. Mimepro [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/pyokui/node/203846> [viitattu 17.11.2021]

Oulun Yliopisto, 2020h. FLOW – Lightweight alkali activated composite foams based on secondary raw materials [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/pyokuien/node/201419> [viitattu 10.11.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Carbon footprint of University of Oulu [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/en/projects/carbon-footprint-university-oulu> [viitattu 13.12.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Civil Engineering Research Unit (CTV) [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/construction/> [viitattu 7.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Electronics and Communications Engineering – Projects [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/eeng/node/13106> [viitattu 25.3.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Energy and Environmental Engineering [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/energy/> [viitattu 7.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Environmental and Chemical Engineering [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/environmentalengineering/> [viitattu 7.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Kaivannaisalan yksikkö – Geologia ja mineralogia [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/katk/node/57641> [viitattu 6.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Kaivannaisalan yksikkö – Kaivostekniikka [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/katk/node/57647> [viitattu 6.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Kaivannaisalan yksikkö – Oulu Mining School [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/katk/> [viitattu 6.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Kemiallinen prosessitekniikka [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/pyokem/> [viitattu 6.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Kestävän kemian tutkimusyksikkö [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/kestavakemia/> [viitattu 6.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Kuitu- ja partikkelitekniikka [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/pyokui/> [viitattu 6.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Luonnontieteellinen tiedekunta. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/fi/yliopisto/tiedekunnat-ja-yksikot/luonnontieteellinen-tiedekunta> [viitattu 11.11.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Materials and mechanical engineering – Modelling and Usability [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/materialsengineering/node/44832> [viitattu 6.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Materials and Mechanical Engineering Unit [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/materialsengineering/> [viitattu 6.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Microelectronics – Projects [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/microelectronics/res/projects> [viitattu 25.3.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Organisaatio [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://patio.oulu.fi/fi/yliopisto/organisaatio> [viitattu 20.9.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Oulun yliopisto – kestävämpi, älykkäämpi, inhimillisempi [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/fi/yliopisto> [viitattu 24.3.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Prosessimetallurgia [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/fi/prosessimetallurgia> [viitattu 7.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Teknillinen tiedekunta [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/fi/yliopisto/tiedekunnat-ja-yksikot/teknillinen-tiedekunta> [viitattu 24.3.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Tiedekunnat ja yksiköt [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/fi/yliopisto/tiedekunnat-ja-yksikot> [viitattu 24.3.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/fi/yliopisto/tiedekunnat-ja-yksikot/tieto-ja-sahkotekniikan-tiedekunta> [viitattu 24.3.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. TST Tutkimusyksiköt [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/fi/tst-tutkimusyksikot> [viitattu 11.11.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Tuotantotalous [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/fi/tuotantotalous> [viitattu 7.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Vesi- ja ympäristötekniikka [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/vesi/> [viitattu 7.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021. Älykkäät koneet ja järjestelmät [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/alykkaat/alykkaat> [viitattu 7.10.2021]



Oulun Yliopisto, 2021a. Carbon footprint of the University of Oulu [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/energy/node/212037> [viitattu 7.10.2021]

Oulun Yliopisto, 2021b. Oulun Yliopisto – Kestävät kampukset [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/yliopisto/node/59518> [viitattu 25.3.2021]

Oulun Yliopisto, 2021c. TOCANEM [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/casr/tocanem> [viitattu 12.4.2021]

Oulun Yliopisto, 2021d. Centre for Advanced Steels Research [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/casr/> [viitattu 19.4.2021]

Oulun Yliopisto, 2021e. CCC – Hiilidioksidia sitovan asetaattiaktivoidun betonin mahdollistavat fysikaaliset mekanismit [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/pyokui/node/198987> [viitattu 10.11.2021]

Oulun Yliopisto, 2021f. ARCTIC-ecocrete – Eco-efficient concreting for arctic region [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/pyokui/node/51813> [viitattu 10.11.2021]

Oulun Yliopisto, 2021g. Kohti kestävämpää tulevaisuutta – GEOMINS-projekti tarjoaa vaihtoehtoja rikastusjätteen käsittelyyn [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/fi/uutiset/kohti-kestavampaa-tulevaisuutta-geomins-projekti-tarjoaa-vaihtoehtoja-rikastusjätteen-kasittelyyn> [viitattu 11.11.2021]

Paloneva M. & Takamäki S., 2020. Yhteenveto toimialojen vähähiilitiekartoista [verkkodokumentti]. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2020:52, Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. ISBN PDF 978-952-327-525-6. Saatavissa: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162494/TEM\\_2020\\_52.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162494/TEM_2020_52.pdf?sequence=1&isAllowed=y) 132 s. [viitattu 15.10.2021]

Pohjola T., 2011. Tulikiven tulisijojen hiilijalanjäljet. Teoksessa: Rohweder L. & Virtanen A. (toim.) Ilmastomuutos käytännössä – hillinnän ja sopeutumisen keinoja. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press, 415 s. ISBN: 978-952-495-178-4 [viitattu 10.11.2021]

Rakennusteollisuus RT ry, 2021. Rakennusteollisuuden tiekartta vähähiilisyyteen (Tiivistelmä) [verkkodokumentti]. Helsinki: Gaia Consulting Oy. Saatavissa: [https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys\\_uudet/rt-vahahiilinen-rakennusteollisuus-tiivistelma-2020-08-20.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys_uudet/rt-vahahiilinen-rakennusteollisuus-tiivistelma-2020-08-20.pdf) [viitattu 13.10.2021]

Rinne P., 2011. Gaian näkökulma: ilmastonmuutoksen hillintä kannattaa. Teoksessa: Rohweder L. & Virtanen A. (toim.) Ilmastonmuutos käytännössä – hillinnän ja sopeutumisen keinoja. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press, 415 s. ISBN: 978-952-495-178-4 [viitattu 10.11.2021]

Rohweder L. & Virtanen A., 2011. Ilmastonmuutos käytännössä – hillinnän ja sopeutumisen keinoja. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press, 415 s. ISBN: 978-952-495-178-4 [viitattu 11.11.2021]

Ruosteenoja K., 2011. Miksi ja miten ilmaston muuttuu? Teoksessa: Rohweder L. & Virtanen A. (toim.) Ilmastonmuutos käytännössä – hillinnän ja sopeutumisen keinoja. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press, 415 s. ISBN: 978-952-495-178-4 [viitattu 11.10.2021]

Sachs J., 2015. The age of sustainable development. Columbia University Press, New York. ISBN 978-0-231-17315-5. 543 s. [viitattu 21.9.2021]

Straub J., 2015. In search of technology readiness level (TRL) 10 [verkkodokumentti]. Aerospace Science and Technology, Volume 46, Pages 312-320, ISSN 1270-9638. Grand Forks: University of North Dakota. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.07.007> [viitattu 25.10.2021]

Sitra, 2021. Tulevaisuussanasto – hiilen sidonta [verkkodokumentti] Helsinki: Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/tulevaisuussanasto/hiilen-sidonta> [21.10.2021]

Sotos M., 2015. GHG Protocol Scope 2 Guidance – An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard [verkkodokumentti]. World Resources Institute. 116 s. Saatavissa: [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Scope%202%20Guidance\\_Final\\_Sept26.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Scope%202%20Guidance_Final_Sept26.pdf) [viitattu 21.10.2021]

SSAB, 2021. HYBRITIN ja fossiilivapaan teräksen aikataulu [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/kestava-kehitys/kestavat-toiminnot/hybrit-phases> [viitattu 21.4.2021]

Suomen virallinen tilasto (SVT), 2020. Kasvihuonekaasut [verkkodokumentti]. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020. Helsinki: Tilastokeskus. ISSN=1797-6049. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/khki/2020/khki\\_2020\\_2021-05-21\\_kat\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-05-21_kat_001_fi.html) [viitattu 12.10.2021]

Suomen virallinen tilasto (SVT), 2020. Sähkön ja lämmön tuotanto [verkkodokumentti]. Helsinki: Tilastokeskus. ISSN=1798-5072. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo\\_2020\\_2021-11-02\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo_2020_2021-11-02_tie_001_fi.html) [viitattu: 10.11.2021].

Suomen virallinen tilasto (SVT), 2020. Teollisuuden energiankäyttö [verkkodokumentti]. Liitetaulukko 3. Sähkön kokonaiskäyttö teollisuudessa vuonna 2019 . Helsinki: Tilastokeskus. ISSN=1798-775X. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/tene/2019/tene\\_2019\\_2020-11-12\\_tau\\_003\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/tene/2019/tene_2019_2020-11-12_tau_003_fi.html) [viitattu: 12.11.2021]

Suomen ympäristökeskus, 2017. Tietoa elinkaariarvioinnista (LCA) ja elinkaariklinikkatoimintamallista pk-yrityksille [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.syke.fi/download/noname/%7B032490FA-19DF-4E5A-A40F-88E22B86DA20%7D/132057> [viitattu 30.9.2021]

Suomen ympäristökeskus, 2019. Ekologiset kompensatiot kannattaa ottaa käyttöön [verkkodokumentti]. SYKE Policy Brief. Saatavissa: [https://issuu.com/suomenymparistokeskus/docs/sykepolicybrief\\_2019-11-20\\_ekologiset-kompensaatio](https://issuu.com/suomenymparistokeskus/docs/sykepolicybrief_2019-11-20_ekologiset-kompensaatio) [viitattu 10.11.2021]

Suomen ympäristökeskus, 2021a. Ilmastonmuutoksen vaikutukset Suomen talouteen [verkkodokumentti]. ilmasto-opas.fi. Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/vaiikutukset/-/artikkeli/51d0c5f5-349b-4ffa-9419-7a78d612c17e/suomen-talous.html> [viitattu 17.9.2021]

Suomen Ympäristökeskus, 2021b. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi [verkkodokumentti]. ilmasto.fi. Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/fd626ba3-8099-40e4-af75-94124d1f5c7f/hiilidioksidin-talteenotto-ja-varastointi.html> [viitattu 19.10.2021]

Suomen ympäristökeskus, 2021c. Hiilinieluista huolehtiminen [verkkodokumentti]. ilmasto-opas.fi. Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/7c821f90-9605-4f9d-827b-894301c1e009/hiilinieluista-huolehtiminen.html> [viitattu 10.11.2021]

Tilastokeskus, 2020. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990-2019 [verkkodokumentti]. Helsinki: Tilastokeskus. ISBN 978-952-244-660-2. 82 s. Saatavissa: [https://www.stat.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/yymp\\_kahup\\_1990-2019\\_2020.pdf](https://www.stat.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/yymp_kahup_1990-2019_2020.pdf) [viitattu 9.4.2021]

Tilastokeskus, 2021. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990-2020 [verkkodokumentti]. Helsinki: Tilastokeskus. ISSN 2670-2568. 109 s. Saatavissa: [https://www.stat.fi/static/media/uploads/yymp\\_kahup\\_1990-2020\\_2021\\_23462\\_net.pdf](https://www.stat.fi/static/media/uploads/yymp_kahup_1990-2020_2021_23462_net.pdf) [viitattu 11.11.2021]

Machek E., Thomas A. & Towery N., 2017. Technology Readiness Level Guidebook [verkkodokumentti]. U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration, 52 s. Saatavissa: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/ear/17047/17047.pdf> [viitattu 28.9.2021]

Unifi, 2021. Johdanto [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.unifi.fi/viestit/kestavan-kehityksen-ja-vastuullisuuden-teesit/teesien-johdanto/> [viitattu 24.3.2021]

Vakkuri R., 2011. Purkubetoni hyödynnetään, mutta vielä yksipuolisesti [verkkodokumentti]. Betoni. Saatavissa: [https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1102\\_s46-51.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1102_s46-51.pdf) [viitattu 10.11.2021]

Valtioneuvosto, 2021. Hallituksen linjaukset puoliväli- ja kehysriihessä 29.4.2021 [verkkodokumentti]. Saatavissa:



<https://vnk.fi/documents/10616/56906592/Hallituksen+linjaukset+puoliväliriihessä+29.4.2021.pdf/fe9617f8-a257-90ea-2ade-9d9afe5284da?t=1620136120152> 55 s. [viitattu 20.9.2021]

Vasara, Lehtinen, Laukkanen, 2020. Teknologiateollisuuden vähähiilitiekartta raportti – vaihe 1 [verkkodokumentti]. Helsinki: Pöry, 79 s. Saatavissa: [https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/inline-files/Teknologiateollisuuden%20tiekartta1\\_Teknologiaselvitys%20vähähiiliratkaisuista\\_Pöry.pdf](https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/inline-files/Teknologiateollisuuden%20tiekartta1_Teknologiaselvitys%20vähähiiliratkaisuista_Pöry.pdf) [viitattu 18.10.2021]

Vasara, Lehtinen, Laukkanen, 2020. Teknologiateollisuuden vähähiilitiekartta raportti – vaihe 2 [verkkodokumentti]. Helsinki: Pöry, 171 s. Saatavissa: [https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/inline-files/Teknologiateollisuuden%20tiekartta2\\_%20Skenaariot%20ja%20kädenjälkitarkastelu\\_Pöry.pdf](https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/inline-files/Teknologiateollisuuden%20tiekartta2_%20Skenaariot%20ja%20kädenjälkitarkastelu_Pöry.pdf) [viitattu 21.5.2021]

Vattenfall, 2021. CO2-tiekartta [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://group.vattenfall.com/fi/mita-teemme/tiekartta-kohti-fossiilivapautta/co2-tiekartta> [viitattu 22.11.2021]

Virtanen A., 2011. Mitä ilmastonmuutos merkitsee ja mitä tulisi tehdä? Teoksessa: Rohweder L. & Virtanen A. (toim.) Ilmastonmuutos käytännössä – hillinnän ja sopeutumisen keinoja. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press, 415 s. ISBN: 978-952-495-178-4 [viitattu 11.10.2021]

VTT, 2021. Hiilikädenjäljestä tuli ympäristökädenjälki – VTT ja LUT kehittivät positiivisten ympäristövaikutusten mittarin ympäristötekojen tueksi [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/hiilikadenjaljesta-tuli-ymparistokadenjalki-vtt-ja-lut-kehittivat-positiivisten> [viitattu 29.9.2021]

Wool2Loop, 2020. The Project [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.wool2loop.eu/en/project/> [viitattu 17.11.2021]

WWF, 2021. Mikä Green Office? [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://wwf.fi/greenoffice/mika-green-office/> [viitattu 25.3.2021]

YK-liitto, 2021a. Kestävän kehityksen tavoitteet [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen YK-liitto. Saatavissa: <https://www.ykliitto.fi/yk-teemat/kestavan-kehityksen-tavoitteet> [viitattu 11.11.2021]

YK-liitto, 2021b. 13 Ilmastotekoa [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen YK-liitto. Saatavissa: <https://www.ykliitto.fi/node/4578> [viitattu 11.11.2021]

Ympäristöministeriö, 2017a. Ilmastomuutoksen hillintä onnistuu sitoutumalla vähähiiliseen yhteiskuntaan [verkkodokumentti]. Helsinki: ympäristö.fi, Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-fi/ilmasto\\_ja\\_ilma/ilmastomuutoksen\\_hillinta](https://www.ymparisto.fi/fi-fi/ilmasto_ja_ilma/ilmastomuutoksen_hillinta) [viitattu 22.11.2021]

Ympäristöministeriö, 2017b. Valtioneuvoston selonteko keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelmasta vuoteen 2030 - Kohti ilmastoviisasta arkea [verkkodokumentti]. Ympäristöministeriön raportteja 21/2017, 142 s. ISBN 978-952-11-4748-7. Saatavissa: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80703/YMra\\_21\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80703/YMra_21_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [viitattu 21.9.2021]

Ympäristöministeriö, 2021a. Mitä on kestävä kehitys? [verkkodokumentti] Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <https://ym.fi/mita-on-kestava-kehitys> [viitattu 11.11.2021]

Ympäristöministeriö, 2021b. Pariisin ilmastopöytäkirja. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://ym.fi/pariisin-ilmastopoytakirja> [viitattu 14.9.2021]

Liite 1. Tiedonkeruutaulukko Prosessimetallurgian tutkimusyksikön projekteista

| Projektin nimi | Projektin kesto             | Kotisivu- ja/tai yhteishenkilö  | Miten projekti tulee vähentämään/kompensoimaan CO2/GHG -päästöjä?                               | Arvio vähennettyjen päästöjen määrästä tai hiilinielun/ varaston koosta | Arvio milloin tämä toteutuu? | Muut osallistuvat partnerit                                      | TRL taso nyt ja projektin tavoite                   |
|----------------|-----------------------------|---|---|---|------------------------------|--|---|
| FFS            | 2021 alkaen<br>2 + 2 vuotta | Petri Sulasalmi   | Hiilipohjaisen teräksen valmistuksesta siirrytään vety- ja sähköpohjaiseen valmistukseen        | 3,9 Mt  | 2040                         | SSAB, Ovako, Valmet, Fortum, Tapojärvi, VTT, Tampereen yliopisto | lähtö tasolta 4 ja pyritään tasolle 6               |
| TOCANEM        | 2020 alkaen<br>3 vuotta     | Aleksi Laukka / <a href="https://www.oulu.fi/casr/tocanem">https://www.oulu.fi/casr/tocanem</a> | Hiilipohjaisen metallin valmistuksesta kestävämpään valmistukseen esim. Sähkön ja vedyn avulla  | 2,6 Mt / 5 Mt   | 2028 / 2040                  | Löytyvät kotisivuilta  | lähtö tasolta 4 ja pyritään tasolle 6               |
| AMET           | 2019 alkaen<br>3 vuotta     | Tuomas Alatarvas  | Prosessin mallinnus ja monitorointi   | 0,2 Mt  | 2023                         | SSAB, Ovako, Sapotech, Luxmet, Sensmet, Åbo Akademi              | SSAB, Ovako, Sapotech, Luxmet, Sensmet, Åbo Akademi |
| SLAGREUS       | 2019 alkaen<br>42 kk        | Mamdouh Omran   | Reuse of slag from integrated steelmaking   |   |                              |  |   |
| Fines2EAF      | 2017-2021                   | Matti Aula  | Sement free brick production technology for the use of primary and secondary raw material fines |   |                              |  |   |

Liite 2. Tiedonkeruutaulukko Ympäristö- ja kemiantekniikan tutkimusyksikön projekteista

| Projektin nimi | Projektin kesto | Kotisivu ja/tai yhteishenkilö | Miten projekti tulee vähentämään/kompensoimaan CO2/GHG -päästöjä?   | Arvio vähennettyjen CO2 päästöjen määrästä tai hiilinielun/varaston koosta                  | Arvio milloin tämä toteutuu?                      | Muut osallistuvat partnerit   | TRL taso nyt ja projektin tavoite |
|----------------|-----------------|-------------------------------|---|---|---|-------------------------------|-----------------------------------|
| BIOSIM         | 2020-2021       | Mika Ruusunen                 | Biojalostamokonseptin energioptimointi, simulaattorin kehittäminen, melassista biomuovin raaka-aineen valmistus, prosessin energiankulutuksen minimointi        | 30% pienempi sähkönkulutus / 1,1 MWh/vuosi / pilottilaitos / iso laitos 50 x                | 2022 pilottilaitos valmis / iso laitos 2024-2025? | tilaustutkimus                | TRL 8                             |
| BIOSFE         | 2020-2021       | Mika Ruusunen                 | Jatkuvatoiminen ylikriittinen hiilidioksiduutto, uutetaan vahaa selluteollisuuden sivuvirroista   | 30 % vähennys sähkönkulutuksessa, vedenkulutusta 25 %                                       | 2021 (1 L reaktori) / 5 v. Päästä isompi laitos?  |                               | TRL 5                             |
| HOPE           | 2020-2022       | Mika Ruusunen                 | Energiajärjestelmän optimointi (sähkö, lämpö, kulutus ja varastointi)   | ainakin 5 % lämmitysenergianvähennyspotentiaali Suomessa, huipputehon vähennys jopa 25-30 % | 2022-2023   | Fortum, ABB, Fidelix          | tutkimus TRL 6, toteutus TRL 9    |
| MAJAKKA        | 2020-2022       | Ari Isokangas                 | Hiilijalanjälkeä pienentäviä teknologioita, tavoitteena työkalupakki, jota yritykset voivat käyttää vähentämään energiankulutustaan                             | 5 % teollisuuden sähkönkulutuksesta (6 Mt/2020 CO2)   | 2025  |                               | TRL 6-9                           |
| OXILATE        | 2020-2022       | Petri Österberg               | Ennustetaan mallipohjaisesti energiatehokkuutta kWh/kg tuotantoprosessissa, kemiallinen prosessi, biotuotelaitoksen osaprosessissa tavoitellaan energiansäästöä | tavoitteena 5 % vähennys sähkönkulutuksessa (200 GWh) tehtaan osaprosessissa                | 2024-2025   | paljon partnereita Euroopasta | TRL 6, tavoitteena TRL 8-9        |



Liite 3. Tiedonkeruutaulukko Energia ja ympäristötekniikan tutkimusyksikön projekteista

| Projektin nimi | Projektin kesto | Kotisivu ja/tai yhteishenkilö   | Lyhyt kuvaus miten projekti tulee aiheuttamaan CO2/KHK päästöjen vähentämistä/kompensointia  | Arvio vähennettyjen CO2 päästöjen määrästä tai hiilinielun/varaston koosta | Arvio milloin tämä toteutuu | Muut osallistuvat partnerit   | TRL taso nyt ja projektin tavoite |
|----------------|-----------------|---|--|--|-----------------------------|---|-----------------------------------|
| Making city    | 12/2018-11/2023 | Eva Pongrácz & Jean-Nicolas Louis;<br><a href="http://makingcity.eu/">http://makingcity.eu/</a>                                 | In this large H2020 project, the Positive Energy District concept is demonstrated in Groningen and Oulu. EEE participates in Oulu Kaukovainio PED by demonstrating citizen interface devices that can help inhabitants reduce their electricity consumption and CO2 emissions  | About 4.5 t CO2/year   | 2023                        | Several partners at UOulu and VTT, but this part is solely attributable | TRL 2 -> TRL 6                    |
| EVISA          | 1/2020-12/2022  | Jenni Ylä-Mella & Victor Pavlov;<br><a href="https://www.oulu.fi/energy/node/197693">https://www.oulu.fi/energy/node/197693</a> | The project aims to provide a tool to port, which they can use to help them reduce their carbon footprint : EVISA would help them to identify their main emissions sources, so we maybe could claim a handprint there...<br>Raahe saved emissions: 805 t CO2e<br>-> using million tonnes of cargo tonnages and Raahe's CF to estimate the other ports' CFs & the same reduction potential, the total saved emissions from all four ports could amount to around 4300 t CO2e. | 4300 t (30 000 t might be possible in the future)                          | 2023 (?)                    | Sole partner  | TRL 2 -> TRL 5                    |
| SINNI          | 10/2020-9/2022  | Eva Pongrácz;<br><a href="https://www.oulu.fi/energy/node/208330">https://www.oulu.fi/energy/node/208330</a>                    | The project will estimate the potential of solar energy generation in villages of Lapland  | 5 kt CO2/year  | 2027                        | Other partners also UOulu   | TRL 2 -> TRL 3                    |

Liite 4. Tiedonkeruutaulukko Kuitu- ja partikkelitekniikan tutkimusyksikön projekteista

| Projektin nimi  | Projektin kesto     | Kotisivu ja/tai yhteis-henkilö | Lyhyt kuvaus miten projekti tulee aiheuttamaan CO2/KHK päästöjen vähentämistä/kompensointia  | Arvio vähennettyjen CO2 päästöjen määrästä tai hiilinielun/varaston koosta | Arvio milloin tämä toteutuu | Muut osallistuvat partnerit           | TRL taso nyt ja projektin tavoite |
|---|---------------------|--------------------------------|--|--|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Selluloosapohjaiset funktionaaliset suodattimet ilmanpuhdistukseen (Sesu) | 1.4.2021-31.12.2022 | Ossi Laitinen                  | Hankkeen tavoitteena on luoda uusia toiminnallisia puupohjaisia materiaaleja, joilla korvataan nykyisin yleisesti käytettyjä synteettisiä kuitumaisia materiaaleja (mm. polyesteri ja viskoosi) ilmanpuhdistukseen liittyvissä sovelluksissa (mm. epäpuhtauksien, pienhiukkasten, virusten ja mikrobien puhdistus ympäröivästä hengitysilmosta). Idea on hyödyntää metsäteollisuuden biopohjaisia kuitulähteitä ja jatkojalostaa niitä uudentyypisiksi suorituskäyisiksi huokoisiksi materiaaleiksi käytettäväksi ympäristö- ja ilmanpuhdistussovelluksissa. |  |                             | Chempolis, Teho Filter, Eagle Filters | TRL4                              |

|  |                        |   |   |  |  |   |      |
|--|------------------------|---|---|--|--|---|------|
| SelDES -<br>Selluloosapitoisten<br>sivujakeiden<br>jalostus DES-<br>pohjaisella<br>prosessilla<br>uusiksi<br>biotuotteiksi | 1.6.2018-<br>31.5.2021 | <a href="https://www oulu.fi/pyokui/node/54639">https://www oulu.fi/pyokui/node/54639</a> | <p>*Kehittää uuden selluloosapitoisten sivujakeiden biojalostuskonseptin soveltuvuutta paikallisille raaka-aineille ja teollisille toimijoille kohti kaupallista hyödyntämistä.</p> <p>*Luoda toimintamalli, jossa yhdistetään paikalliset sivujakeiden tuottajat (esim. paperitehdas) ja niiden jalostajat (esim. biokemikaalin valmistaja, erityisesti pk-yritykset) uusien biotuotteiden ja –kemikaalien valmistamiseksi.</p> <p>*Kehittää uusia biopohjaisia lopputuotteita paikallisista raaka-aineista (tutkimukseen saatavilla edustavia näytteitä alueen eri biotalouden yrityksistä) sekä uusien tuotteiden ympärille syntyvän uuden yritystoiminnan ja osaamisen edistäminen.</p> <p>*Parantaa alueen yritysten liiketoiminnan kestävyyttä ja kilpailukykyä materiaali- ja energiatehokkuutta lisäämällä (vähähiilisyys, joka syntyy sivujakeiden hyödyntämisestä vihreällä teknologialla ja öljypohjaisten materiaalien korvaamisella)</p> |  |  | Pölkky,<br>KaiCell<br>Fibers, Stora<br>Enso Oulu,<br>Kiertokaari ja<br>Kemira | TRL4 |
|--|------------------------|---|---|--|--|---|------|

|  |                        |   |   |  |  |   |      |
|--|------------------------|---|---|--|--|---|------|
| VIKE<br>Öljyntorjunta<br>valmiuden<br>parantaminen<br>vihreillä<br>kemikaaleilla | 1.6.2015-<br>31.7.2018 | <a href="http://www.oulu.fi/pyokui/node/33032">http://www.oulu.fi/pyokui/node/33032</a> | VIKE-projektin tavoitteena on luoda uutta tietoa sekä tutkia teknologisia ratkaisuja, joilla tehostetaan arktista öljyntorjuntavalmiutta yhdistämällä uudet vihreät kemikaalit mekaaniseen öljyntorjuntakonseptiin. Konsepti on tarkoitettu rannikon läheiseen öljyntorjuntaan sekä vesistöissä (satamat ja väylät) että maaperän puhdistukseen esim. säiliöalueilla. VIKE-projektin tavoitteena onkin vahvistaa alueen olemassa olevia metsäyhtiöitä ja erikoiskemikaalien valmistukseen sekä mekaaniseen öljyntorjuntaan erikoistuneita yrityksiä. Projektissa halutaan luoda pohja uudelle alueelliselle yritystoiminnalle ja vakiinnuttaa Oulun yliopiston ja LTY:n vihreän kemian laboratorion biotaloustutkimusta kehittämällä ja demonstroimalla uusia vihreitä öljyntorjuntakemikaaleja, jotka mahdollistavat uusien korkean lisäarvon luonnonpolymeerituotteiden (selluloosa ja kitosaani) ”vihreät kemikaalit” valmistamisen. | Hankkeessa saatiin kehitettyä kolme erityyppistä tuotetta öljypitoisten vesien käsittelyyn (kaksi erityyppistä emulgointiainetta (selluloosa- ja kitosaanipohjainen) sekä arogeelirakenteiset absorbentit) |  | Peltaco, Chemec, Arctia, Oulun satama sekä Oulun ja Etelä-Savon pelastuslaitokset | TRL5 |
|--|------------------------|---|---|--|--|---|------|



|  |                        |            |  |  |  |  |      |
|--|------------------------|------------|--|--|--|--|------|
| ARVOPURU<br>-Uudet<br>menetelmät<br>mekaanisen<br>puunjalostust<br>eollisuuden<br>sahanpurun<br>jalostamiseksi<br>i arvokkaiksi<br>biotuotteiksi | 2.1.2018-<br>30.6.2020 | Ari Ämmälä | <p>(1) Purun esikäsittelymenetelmien testaus. Esikäsittelyyn on useita vaihtoehtoja testattavaksi: Purun luokittelu ligniinipitoisen jakeen poistamiseksi, lämpö-, paine-, tai kevyt kemiallinen/liuotinkäsittely ligniinin rakenteen pehmentämiseksi/haurastuttamiseksi.</p> <p>(2) Mekaanisen kuidutuksen tutkimus ja optimointi. Kuidutuksen tavoitteena on ensisijaisesti nanokuidut ja mikrofibrillit mutta myös ”tavalliset” puukuidut riippuen loppukäytöstä. Työpaketissa tutkitaan vaihtoehtoisia tapoja kuiduttaa purua. Menetelminä ovat hionta, ekstruusio ja korkeapainehomogenisointi. Tutkittavana on myös kuidutusolosuhteiden optimointi sekä purun esikäsittelymenetelmien vaikutus kuidutukseen.</p> <p>(3) Kuitujen ominaisuuksien analysointi ja toimivuuden testaus eri biotuotteissa. Eri prosessointireiteillä valmistettujen nanokuitujen ominaisuudet analysoidaan ja valitaan niille soveltuva biotuotetestiympäristö. Ligniinipitoisilla nanokuiduilla ominaisuusyhdistelmiä, jotka poikkeavat sellupohjaisista nanokuiduista: suuri lujuus, matala viskositeetti ja vesiretentio, kuivattuina ne ovat helposti uudelleen dispergoitavissa. Kuitu- tai nanokuituvahvisteiset biokomposiitit, kemiallisesti aktivoitunut nanokuidut esim. jätevesien puhdistukseen, kuidut ja nanokuitusidosaineet kartonkien valmistukseen ovat potentiaalisia biotuotteita.</p> <p>(4) Lupaavimpien prosessikonseptien arviointi. Hankkeen lopuksi arvioidaan alustavasti mahdolliset teknistaloudelliset prosessivaihtoehdot pilotoitavaksi.</p> |  |  | HASA,<br>Junnikkala,<br>Westas,<br>Keitele<br>Group,<br>Kuhmo,<br>Pölkky | TRL4 |
|--|------------------------|------------|--|--|--|--|------|

|          |                        |   |   |                                     |      |  |       |
|----------|------------------------|---|---|-------------------------------------|------|--|-------|
| CCC      | 1.9.2019 to 31.8.2023  | <a href="https://www oulu.fi/pyokuinen/node/193264">https://www oulu.fi/pyokuinen/node/193264</a> | A low-CO <sub>2</sub> alternative to cement is developed that can be used to replace regular cement, lowering its CO <sub>2</sub> emissions.  | Reduction of up to 1 Gt/a globally. | 2026 | Prof. John Provis' research group at the University of Sheffield. Prof. Chris Cheeseman's group at Imperial College London. The NMR Research Unit (lead by Prof. Ville-Veikko Telkki).   | TRL 0 |
| CEMGLASS | 1.1.2020 to 31.12.2023 | <a href="https://www oulu.fi/pyokuinen/node/198986">https://www oulu.fi/pyokuinen/node/198986</a> | The project studies the fundamental reactions of an experimental cement, which is based on hydrated magnesium carbonates. The cement hardens by incorporating carbon dioxide in its structure, leading to mineralized CO <sub>2</sub> , which will therefore be indefinitely stored and further stabilized over time. As a result, cement manufacturing could be done with net-negative carbon emissions. | Capture of up to 1 Gt/a globally.   | 2035 | Prof. Hegoi Manzano Assistant Professor at the Department of Condensed Matter Physics from the UPV/EHU. Prof. Wei Cao in materials physics at the University of Oulu. Prof. John Provis' | TRL 3 |

|         |           |   |  |   |      |  |   |
|---------|-----------|---|--|---|------|--|---|
| TOCANEM | 2020-2023 | <u>Timo Fabritus</u>  | TOCANEM projektissa (KUIPan osuudessa) tutkitaan rautapitoisten kuonien hyötykäyttöä geopolymeereissä sekä CSAB-sementin valmistusta. CSAB-sementin päästöt ovat noin 30% pienemmät kuin perinteisen OPC-sementin. Visa Isteri viimeistelee väitöskirjaa CSAB-sementin valmistuksesta ja pilotoinnista pilot-mittakaavan uunissa. Rautapitoisia kuonia syntyy yhteensä 800 000 t/a (200 000 t + 200 000 t + 400 000 t). Oletetaan että CSAB sementtiä voitaisiin valmistaa 500 000 t/a ja rautakuonista 50% voitaisiin käyttää sellaisenaan sementin korvaamiseksi.  | Suomessa 280 000 t/a (tässä laskelmat: CSAB: $(500\,000 \times 0,8) \times 0,3 = 120\,000$ t/a, Fe-kuonat: $((800\,000 \times 0,5) \times 0,8) / 2 = 160\,000$ t)   | 2030 | PYOMET, Boliden Harjavalta, Boliden Kokkola jne            | 4 geopolymeerien osalta ja CSAB sementin osalta 7 tai 8 |
| MIMEPRO | 2020-2022 | <a href="https://www.oulu.fi/pyokuinen/node/203845">https://www.oulu.fi/pyokuinen/node/203845</a> | MIMEPRO:ssa tutkitaan metallien talteenottoa sivuvirroista (PYOMET+SUSCHEM) sekä mineraalisten sivuvirtojen hyödyntämistä rakennustuotteissa (PYOKUI). Tutkittavat sivuvirrat ovat kuonat, jätteenpolton tuhka, biotuhkat, viherlipeäsakka, soodakattilan suola. Tutkitaan sementin korvausta (masuunikuonalla 200 000 t/a ja lentotuhkilla 50 000 t/a), vaihtoehtoisia alkaliaktivaattoreita sekä sivuvirtojen hiilen sidontaa. Tuhkia syntyy n 600 000 t/a ( <a href="https://yle.fi/uutiset/3-6899345">https://yle.fi/uutiset/3-6899345</a> ) joista 50 000 t voitaisiin käyttää sementin korvaamiseen, viherlipeäsakkaa 170 000 t (Jäteveroselvitys kaatopaikalle sijoitettavista jätteistä. Taustamuistio 9.11.2020) josta 42 500 t voitaisiin käyttää alkaliaktivaattorin korvaamiseksi ja soodakattilan suolaa 20 000 t josta 5 000 t voitaisiin käyttää alkaliaktivaattorin korvaamiseen. Lisäksi 300 000 t tuhkia voitaisiin käyttää hiilen sidontaan ja oletuksena on että tuhkat voivat sitoa keskimäärin 100 kg CO <sub>2</sub> :sta per tonni tuhkaa. | 302 000 t/a<br>Suomessa (lentotuhka $100\,000 \times 0,8 = 80\,000$ t, viherlipeäsakka + kuona $140\,000 \times 0,8 = 112\,000$ t, soodakattilan suola + kuona $100\,000 \times 0,8 = 80\,000$ t. Lisäksi CO <sub>2</sub> -sidonta $300\,000 \times 0,1 = 30\,000$ t) | 2030 | PYOMET, SUSCHEM, Fortum, Metsä, Valmet, Stora Enso, Matmur | 4   |

|                 |           |   |  |  |      |                           |   |
|-----------------|-----------|---|--|--|------|---------------------------|---|
| ARCTIC-ecocrete | 2018-2021 | <a href="https://www oulu.fi/pyokui/node/51813">https://www oulu.fi/pyokui/node/51813</a> | Tutkitaan OPC-sementin korvausta ympäristöystävällisemmillä ns. "onepart alkali activated materials". Granuloitua masuunikuonaa syntyy 500 000 t ( <a href="http://cc oulu.fi/~kamahei/m/477420S/MVNJT2020-Isokaanta-3.pdf">http://cc oulu.fi/~kamahei/m/477420S/MVNJT2020-Isokaanta-3.pdf</a> ). Oletetaan että 50 000 t sementtiä voidaan korvata geopolymeereillä.  | (50 000x0,8)x0,5=20 000 t/a Suomessa                             | 2025 | LTU, Sintef Narvik        | 4 |
| DeCONCRETE      | 2019-2022 | Priya Perumal. <a href="https://narfu.ru/deconcrete/">https://narfu.ru/deconcrete/</a>    | Purkubetonin hyödyttäminen ja karbonointi eli hiilen mineralisointi. 700 000 t/a betonia puretaan Suomessa ( <a href="https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/334745/Markus_H%C3%A4kk%C3%A4nen.pdf?sequence=2&amp;isAllowed=y">https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/334745/Markus_H%C3%A4kk%C3%A4nen.pdf?sequence=2&amp;isAllowed=y</a> ). Oletetaan että sementistä voidaan korvata 20 000 t purkubetonilla ja purkubetoni sitoo CO2:sta 11 kg per tonni purkubetonia (10.3151/jact.9.115) | Suomessa 23 700 t/a (20 000x0,8=16 000 t, 700 000x0,011=7 700 t) | 2025 | Narfu, UiT, Sintef Narvik | 4 |
| SULTAN          |           | Mirja Illikainen  | Tutkitaan rikastushiekköjen geopolymerisointia. Pieni osa (1%) rikastushiekoista voitaisiin käyttää sementin korvaajana 20 v päästä. Rikastushiekköja syntyy 23 000 000 t/a ( <a href="https://www.stat.fi/tietotrendit/artikkelit/2019/kaivosten-kokonaisnostosta-valtaosa-paatyy-jatteenksi/">https://www.stat.fi/tietotrendit/artikkelit/2019/kaivosten-kokonaisnostosta-valtaosa-paatyy-jatteenksi/</a> )  | ((0,01x23 000 000)x0,8)x0,5=92 000 t/a Suomessa                  | 2040 |                           | 4 |



|             |           |   |  |  |      |              |   |
|-------------|-----------|---|--|--|------|--------------|---|
| GEOMINS     | 2019-2022 | <a href="https://www.oulu.fi/pyokui/geomins">https://www.oulu.fi/pyokui/geomins</a>                               | Tutkitaan rikastushiekkojen geopolymerisointia ja hiilen sidontaa. Osa rikastushiekoista voisi karbonoitua ja siten sitoa hiiltä. Ks myös SULTAN projekti. Oletetaan että 1 tonni rikastuhiekkaa voi sitoa 1 kg CO <sub>2</sub> :sta | 94 300 t/a Suomessa<br>[ $((0,01 \times 23\,000\,000) \times 0,8) \times 0,5 = 92\,000$ ,<br>$(0,01 \times 23\,000\,000) \times 0,01 = 23\,000$ t] | 2040 |              | 4 |
| Wool2loop   | 2019-2022 | <a href="https://www.wool2loop.eu/en/">https://www.wool2loop.eu/en/</a>   | Projektissa tutkitaan mineraalivillojen geopolymerisointia. Niillä voitaisiin korvata OPC-sementtiä. 20-30 000 t/vuosi Suomessa.   | $(25\,000 \times 0,8) \times 0,5 = 10\,000$ t/a Suomessa   | 2025 | Saint Gobain | 4 |
| GeoFUN      |           | Tero Luukkonen  |  | ei suoria vaikutuksia  |      |              |   |
| MinChelator |           | Juho Yliniemi   |  | ei vielä arviota   |      |              |   |
| W2W         | 2020-2022 | Priya Perumal.<br><a href="https://www.oulu.fi/pyokuien/node/205352">https://www.oulu.fi/pyokuien/node/205352</a> |  |  |      |              |   |

|      |           |  |  |   |  |  |        |
|------|-----------|--|--|---|--|--|--------|
| FLOW | 2018-2021 | Päivö Kinnunen.<br><a href="https://www oulu.fi/pyokuien/node/201419">https://www oulu.fi/pyokuien/node/201419</a> | Tutkitaan SSAB kuonien hyötykäyttöä sementin korvaamisessa. Kuonia (pois lukien masuunikuonaa) syntyy yhteensä noin 400 000 t/a (180 000 t + 30 000 t + 200 000 t). Oletetaan että puolet kuonista soveltuvat sementin korvaamiseksi. Lisäksi menossa pilotointi, jossa potentiaalisesti sidotaan 5 000 tonnia hiilidioksidia vuodessa (BOF kuona SSAB). | 165 000 t/a Suomessa [(200 000x0,8)x0,5 +5 000] |  |  | 4 ja 5 |
|------|-----------|--|--|---|--|--|--------|

Liite 5. Tiedonkeruutaulukko Vesi- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikön projekteista

| Projektin nimi | Projektin kesto | Kotisivu ja/tai yhteishenkilö      | Miten projekti tulee aiheuttamaan CO2/GHG päästöjen vähentämistä/kompensointia  | Arvio vähennettyjen CO2 päästöjen määrästä tai hiilinielun/varaston koosta  | Arvio milloin tämä toteutuu | Muut osallistuvat partnerit  | TRL taso nyt ja projektin tavoite   |
|----------------|-----------------|------------------------------------|---|---|-----------------------------|--|---|
| TURNEE         |                 | Hannu Marttila                     | Metsät turvemailla – ratkaisuja päästöjen hillintään ja hiilinielujen kasvattamiseen, rehevien soiden ennallistaminen, käytöstä poistuvien turvemaiden metsittämisen päästöselvitykset  | Nykytilanteessa ojitettujen turvemaiden päästöt vaikeuttavat maankäyttösektorin mahdollisuuksia saavuttaa tätä tavoitetta: kun LULUCF-sektorin nettonielut v. 2018 olivat 10 Mt CO <sub>2</sub> -eq, aiheutui ojitettujen soiden turpeen hajoamisesta 16 Mt CO <sub>2</sub> -eq päästöt (Tilastokeskus, 2020). Toisaalta jos turvemaiden päästöjä kyet-täisiin voimakkaasti hillitsemään tai kääntämään jopa nieluksi, voitaisiin sektorin nettohiilinielut lähes kaksinkertaistaa. | 2035                        | Helsingin Yliopisto, Ilmatieteenlaitos, LUKE, Seinäjoen ammattikorkeakoulu, metsän- ja maanomistajat | tavoitteena TRL 9, riippuu maanomistajien käyttöönottamista tekniikoista, myös poliittiset päätökset ja tukiasiat vaikuttavat |
| RATKU          | 2021-2023       | Maarit Liimatainen, Hannu Marttila | Ratkaisuja turvemaiden eri maankäyttömuotojen ympäristövaikutusten vähentämiseen, tutkitaan eri kasvilajeja, voidaanko turvemaita viljellä vai tehdäänkö niille jotain muuta, tutkitaan rinnakkain kasvihuonekaasupäästöjä ja vedenlaatua ja vesistöpäästöjä, tutkitaan | Maamme maapinta-alasta on kolmasosa turvemaata (10 milj. ha) ja siitä on runsas puolet kuivatettu metsätalouden (5,4 milj. ha), maatalouden (0,26 milj. ha) ja energiatuotannon (0,06 milj. ha) käyttöön. Turvemaiden osuus maa-alasta on suurin Pohjois-Pohjanmaan (46 %) ja Kainuun läntisimmällä osalla (40 %). Noin 60 % alueen soista on ojitettu metsän kasvun parantamiseksi ja maatalousmaasta on   | 2035                        | LUKE, Naturcom, Boreal kasvintuotanto  | tavoitteena TRL 9, riippuu maanomistajien käyttöönottamista tekniikoista, myös poliittiset päätökset ja tukiasiat vaikuttavat |

|           |           |                                    |  |   |      |      |   |
|-----------|-----------|------------------------------------|--|---|------|------|---|
|           |           |                                    | happamien sulfaattimaiden osuutta  | noin kolmasosa turvepeltoja. Pohjois-Pohjanmaalla on lisäksi runsaasti energiatuotannossa olevia soita. |      |      |   |
| TurveSopu | 2020-2022 | Maarit Liimatainen, Hannu Marttila | Maa- ja metsätalouden turvemaiden vesien yhteishallinta ravinnekuormituksen ja valunnan määrän näkökulmasta (TurveSopu) Pohjavedenpinnan pitäminen tasaisena, kastelu, kustannusten selvittäminen, tarkempaa tietoa Pohjois-Suomeen ja tämän alueen soista, varmistetaan toimenpiteiden toiminta juuri Pohjois-Suomen alueella |   | 2035 | LUKE | tavoitteena TRL 9, riippuu maanomistajien käyttöönottamista tekniikoista, myös poliittiset päätökset ja tukiasiat vaikuttavat |



|      |           |                                    |   |  |      |   |   |
|------|-----------|------------------------------------|---|--|------|---|---|
| VAPÄ | 2021-2023 | Maarit Liimatainen, Hannu Marttila | Hankkeen tarkoituksena on tukea viljelijöitä heidän työssään ja selvittää eloperäisten viljelymaiden kasvihuonekaasupäästöjä vähentävien viljelytekniikoiden kuten kevennetyn muokkauksen ja pohjaveden pinnan noston toteutuksen mahdollisuuksia ja esteitä tilatasolla. Kootaan tietopankki viljeltyjen eloperäisten maiden kasvihuonekaasupäästöistä ja niihin vaikuttavista tekijöistä. Tehdään kyselyitä viljelijöille, Tehdään demonstrointeja ja pilotointeja tilatasolla testaten potentiaalisia viljelytoimia yhdessä viljelijän kanssa. |  | 2035 | LUKE, ProAgria Oulu, Valio, Osuuskunta Pohjolan maito, viljelijät | tavoitteena TRL 9, riippuu maanomistajien käyttöönottamista tekniikoista, myös poliittiset päätökset ja tukiasiat vaikuttavat |
|------|-----------|------------------------------------|---|--|------|---|---|

Liite 6. Tiedonkeruutaulukko Älykkäät koneet ja järjestelmät -tutkimusyksikön projekteista

| Projektin nimi | Projektin kesto   | Kotisivu ja/tai yhteishenkilö | Lyhyt kuvaus miten projekti tulee aiheuttamaan CO2/KHK päästöjen vähentämistä/kompensointia  | Arvio vähennettyjen CO2 päästöjen määrästä tai hiilinielun/varaston koosta | Arvio milloin tämä toteutuu | Muut osallistuvat partnerit              | TRL taso nyt ja projektin tavoite |
|----------------|---|-------------------------------|--|--|-----------------------------|--|-----------------------------------|
| ESKE           | 1,5 v, kesäkuussa 2021  | Toni Liedes                   | Maa- ja metsätalouden valumavesien hallinta, padottaminen / tekniikan kehittäminen/ mahdollistaminen (metaanipäästöjen vähentäminen) |  | 3-5 vuotta                  | ELY rahoittamassa                        | lähtö tasolta 4, tavoitteena 7    |
| VESIHIISI      | n. 2,5 vuotta, aloitus kesäkuussa 2021 ja vuoden 2023 loppuun | Toni Liedes                   | Hyödyntää ESKE:n tekniikkaa / ohjausautomaatio, miten hallitaan patoja ja miten mitataan   |  | 5-10 vuotta                 | LUKE, Maanmittauslaitos, Salaojayhdistys | lähtö tasolta 4, tavoitteena 7    |
| COGNITWIN      |   | Enso Ikonen                   |  |  |                             |  |                                   |

Liite 7. Tiedonkeruutaulukko Arkkitehtuurin tutkimusyksikön projekteista

| Projektin nimi  | Projektin kesto      | Kotisivu ja/tai yhteishenkilö  | Miten projekti tulee aiheuttamaan CO2/GHG päästöjen vähentämistä/kompensointia   | Arvio vähennettyjen CO2 päästöjen määrästä tai hiilinielun/varaston koosta | Arvio milloin tämä toteutuu | Muut osallistuvat partnerit   | TRL taso nyt ja projektin tavoite |
|---|----------------------|--|--|--|-----------------------------|---|-----------------------------------|
| IPAWA   | 1.7.2019 - 30.9.2022 | <a href="https://www.eura2014.fi/rrtiepa/projekti.php?projektikoodi=A75351">https://www.eura2014.fi/rrtiepa/projekti.php?projektikoodi=A75351</a><br><br><u>Tarja Outila</u> | Pysäköinnin ja hulevesien yhteensovittamista ja selvittämistä, pysäköinnin optimoinnilla vähennetään ruuhkia, mitottamaan pysäköintialueet |  |                             | Lapti, Oulun rakennusteho Oy,                                       | TRL 2 - tavoitteena TRL 3         |
| WellIT, Intelligent Lighting and Well-Being in Northern Learning Environments | 1.9.2017- 31.12.2020 | Henrika Pihlajaniemi   | Älykkään valaistuksen tutkiminen oppimisympäristöissä  |  |                             |   | TRL 5-6                           |
| Log - Intelligence for Future   | 2021-2022            | Janne Pihlajaniemi   | Hirsitaloteollisuuden viennin edistäminen, tutkimusosuudessa tutkitaan kohdealueelle kohdistuvan viennin mahdollisuuksia ja haasteita      |  |                             | HTT ry. Hirsitaloteollisuuden vetämä, business finlandin rahoittama | TRL 2-3 (osaksi TRL 6)            |
|   |                      | Janne Pihlajaniemi, modernihirsikaupunki.fi  | Jatkuvaa tutkimustyötä massiivipuurakentamisen osalta  |  |                             |   |                                   |

Liite 8. Tiedonkeruutaulukko NMR – tutkimusyksikön projekteista

| Projektin nimi                  | Projektin kesto     | Kotisivu ja/tai yhteishenkilö   | Miten projekti tulee aiheuttamaan CO2/GHG päästöjen vähentämistä/kompensointia  | Arvio vähennettyjen CO2 päästöjen määrästä tai hiilinielun/varaston koosta | Arvio milloin tämä toteutuu | Muut osallistuvat partnerit | TRL taso nyt ja projektin tavoite |
|---------------------------------|---------------------|---|---|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Ultrafast Laplace NMR           | 1.4.2018-31.3.2023  | Ville-Veikko Telkki<br><a href="http://cc.oulu.fi/~nmrwww/">http://cc.oulu.fi/~nmrwww/</a>    | Menetelmä, jota voidaan hyödyntää ekosementti-, nanoselluloosa-, ligniini-, mahd. myös akkututkimuksissa ja REE-tutkimuksissa | enabler-tutkimus, analyysimenetelmäkehitys                                 |                             |                             |                                   |
| Advanced NMR for sustainability | 1.1.2021-31.12.2024 | <a href="https://www.oulu.fi/kvantum/node/206158">https://www.oulu.fi/kvantum/node/206158</a> | Menetelmä, jota voidaan hyödyntää ekosementti-, nanoselluloosa-, ligniini-, mahd. myös akkututkimuksissa ja REE-tutkimuksissa |  |                             |                             |                                   |



|   |                    |                    |  |  |  |  |  |
|---|--------------------|--------------------|--|--|--|--|--|
| Ylempien projektien alla tehdään aerosolitutkimusta                           |                    |                    | tavoitteena ymmärtää aerosolien rooli ilmastomuutoksessa |  |  |  |  |
| Zero-CO2 cement concept evaluated with novel Nuclear Magnetic Resonance (NMR) | 1.9.2021-31.8.2023 | Dr. Sarah Mailhiot |  |  |  |  |  |